

Üç fazlı asenkron motorlarda sıcaklık dağılımının çıkartılarak tasarım optimizasyonunun yapılması

Filiz GÜRGÖZE*, A. Faik MERGEN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Basit ve sağlam yapıları nedeniyle asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda en yaygın elektrik motorlarıdır. Artan malzeme maliyetleri, elektrikli otomobiller ve beyaz eşya sektörü gibi alanlarda kompakt yapıda elektrik motorlarına duyulan ihtiyaç ve değişken hızlı tahriklerin yaygın kullanımını nedeniyle makinanın çeşitli kısımlarındaki sıcaklık artışının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, asenkron motorlarda sürekli halde sıcaklık dağılımını ve ısı geçici rejimi belirlemek üzere akım kaynaklı elektriksel devre benzeşimine dayanan bir ısı model oluşturulmuştur. Isıl modeli oluşturmakta kullanılan kritik parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerin hesabı incelenmiştir. Farklı yükleme durumları için elde edilen sonuçlar deneysel yolla elde edilen verilerle kıyaslanarak modelin doğruluğu gösterilmiştir. Asenkron motorun sürekli rejimdeki işletme yüklerini hesaplayan bir tasarım programı yazılmıştır. Gerek imalatçı, gerek kullanıcı açısından motor performansının iyileştirilmesi ve maliyetin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır. İşletme maliyetinin toplam maliyetin büyük bir kısmını oluşturması nedeniyle, işletme maliyetinin, motorda kullanılan aktif malzemelerin iyileştirilmesi ve motor tasarım değişkenlerinin optimizasyonu yoluyla azaltılması büyük önem taşır. Isıl model, asenkron motor tasarım programıyla birleştirilerek motor tasarım optimizasyonu için kullanılmıştır. Sabit güçte, mevcut tasarıma göre daha yüksek verimli, kompakt ve sıcaklık artışı minimumlaştırılmış bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak ısı işlem benzeşimi kullanılmış ve asenkron motorun çok amaçlı tasarım optimizasyonu için basit ve verimli bir yapay ısı işlem algoritması geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isıl modelleme, yapay ısı işlem benzeşimi, tasarım optimizasyonu, çok amaçlı optimizasyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Filiz GÜRGÖZE. filiz@elk.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 75.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Asenkron motorların sıcaklık dağılımının çıkartılarak tasarım optimizasyonunun yapılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 13.05.2009 tarihinde dergiye ulaşılmış, 15.07.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Design optimization by employing thermal distribution in 3-phase induction motors

Extended abstract

Induction motors are most common electric motors for industrial application due to their simple construction and robustness. Because of increased material costs, need of compactness for many applications and extensive use of variable speed drives, the temperature rise should be investigated in various part of an induction motor. An useful method of thermal analysis is to use an equivalent electrical circuit. By electro-thermal analogy based on well-known Poisson and Laplace equations, thermal behaviour of induction motor could be represented through electrical elements, such as resistors, capacitors and independent current sources.

Induction motor can be geometrically divided to eight components which are connected to each other via thermal resistances. Each part has a bulk thermal storage. In the network, a node denotes the mean temperature of the component. All network parameters are derived from dimensional information of motor components, thermal properties of materials used in motor construction and several thermal constants such as thermal conduction and convection coefficients. Different operating power losses of motor from the current sources which represent the heat sources. The overall network can be represented as a linear set of 8 equations.

A thermal model for estimating the steady-state temperature distribution and transient thermal behaviour of a 3-phase induction motor was developed in this study. Critical parameters of the model such as convection film coefficients of air gap, end cap air and frame, frame-stator yoke thermal contact coefficient were determined and their computations and experimental methods were discussed. The accuracy of the model for both steady state and transient cases was proven by comparing the calculated results that obtained from various load conditions with those of the experimental results. The temperatures at different points of motor stator and body were obtained using thermocouple sensors and infrared thermometer. The results were also verified by comparing a 2D finite element model. To show the sensitivity of the model to its component, a sensitivity analysis was conducted.

It is important to improve the performance and to reduce the cost of the machine from the both manufacturers and customers point of view. Operating cost is the main part of the total cost. It is achieved by increasing motor efficiency through improving the materials and optimizing the motor design variable. The thermal model integrated with design program was used for induction motor design optimization. The aim of design optimization is to several objective functions $F(x)$ reach their optimum values while keeping others in their acceptable limits. Simulated annealing was chosen as optimization method. This process is based on an analogy from thermodynamics where a system is slowly cooled in order to achieve its lowest energy state. Simulated annealing is an hill climbing iterative search in which sometimes the points corresponding to worse objective function values can be accepted in order to avoiding to trapped in a local minima. The algorithm employs a random search, which not only accepts changes that decrease objective function, f , but also some changes that increase it. The latter are accepted with a probability $p = \exp(-\Delta F/T)$, where ΔF is the decrease in F and T is an independent control parameter that simulates the impact of thermodynamic temperature in physical annealing. A simple and efficient simulated annealing algorithm was developed to obtain multi-objective design optimization of the induction motor. The accuracy of algorithm was proven by optimizing some well-known optimization test functions. The algorithm was also tested by comparing it with the well known methods such as pattern search and adaptive simulated annealing. Some of the the selected objective functions are temperature, efficiency and weights of active parts such as stator and rotor magnetic circuits and windings. These objectives were optimized under several constraints such as start-up torque and current, nominal and pull off torques, magnetizing current, and power factor. The induction motor's steady state performance was calculated by a design program which was written as a part of this study. Only dominated solutions were accepted. A more efficient, more compact motor design with minimum temperature rise was achieved for constant power.

Keywords: Thermal modelling, simulated annealing, design optimization, multi-objective optimization.

Giriş

Asenkron motorlar, yapılarının basitliği, üretim kolaylığı, düşük üretim ve bakım maliyetleri, yüksek güvenilirlik gibi nedenlerden dolayı elektromekanik enerji dönüşümünde en yaygın olarak kullanılan motor tipidir (TEK, 1993; Önbilgin, 1993). Mevcut doğal kaynakların hızla tüketimi ve alternatiflerinin üretilmesinde yaşanan sorunlar, artan enerji maliyetleri, uluslararası pazardaki rekabet koşulları gibi faktörler göz önüne alındığında bu denli yaygın bir kullanıma sahip motorlar için üretim ve işletme verimliliği ülke ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Öte yandan teknolojinin geldiği noktada otomotiv sanayinden, havacılığa veya beyaz eşya sektörüne kadar her alanda kompakt yapıda elektrik motorlarının kullanımı ihtiyacı artmıştır (Fouladgar vd., 2000; Cho vd., 2001; Javad vd., 2006). Bir elektrik motorunda işletme verimini arttırmak stator sargısında kullanılan bakır, rotor kafesi ve kısa devre halkalarında kullanılan alüminyum veya bakır ile manyetik nüve sacı gibi aktif malzemelerin iyileştirilmesi ve/veya tasarımının optimize edilmesiyle mümkün olmaktadır.

Enerji ve/veya maliyet fonksiyonlarının minimumlaştırılması, ekonomi, fizik, kimya, istatistik ve mühendislik problemleri gibi pek çok alanda problem çözümünde kullanılan temel kavramlardan birisidir. Optimizasyon problemleri; bir $F(X)$ fonksiyonunu, $g_i(X) \geq 0$ ($i=1,2,\dots,m$) ve $h_j(X)=b_j$ ($i=1,2,\dots,k$ ve $b_k=sbt$) sınırlamaları altında en büyük veya en küçük yapacak $X=[x_1,x_2,\dots,x_n]$ değerlerini bulmaktan ibarettir. Burada $F(X)$ “amaç fonksiyonu”, g ve h fonksiyonları ise kısıtlama olarak adlandırılır. Genel olarak, optimizasyon yöntemleri, X değişken vektörünün elemanlarını amaç fonksiyonunda istenen değişikliği sağlayacak yönde değiştirmek yoluyla sonuca ulaşırlar.

F fonksiyonu tüm $\lambda \in (0,1)$ değerleri için aşağıdaki denklemi sağlıyorsa konveks yapıdadır. Fonksiyonların konveks yapıda olması durumunda, değer azalışının yönü türevle kolaylıkla tespit edilebilir, çünkü fonksiyonun sadece bir minimumu (veya maksimumu) bulunmaktadır.

$$F(\lambda x_i + (1 - \lambda)x_j) \leq \lambda F(x_i) + (1 - \lambda)F(x_j) \quad (1)$$

Öte yandan problem birden fazla minimuma sahip non-konveks yapıdaysa, başlangıç noktasına bağlı olarak türev işlemi ile bu minimumlardan herhangi birine ulaşılabilir ve bu nokta fonksiyonun yerel minimumu olabilir. Dolayısıyla gradyana dayalı klasik yöntemler bu tarz problemlerin çözümü için uygun olmayacaktır.

Bir problemin matematiksel formülasyonunun yapılamadığı, çözümün klasik yöntemlerle zor veya olanaksız olduğu durumlarda, optimizasyon probleminin çözümü için, amaç ve sınır fonksiyonlarının belirli bir noktada aldıkları değer haricinde herhangi bir analitik bilgiye ihtiyaç duymayan ve “dolaysız yöntemler” olarak adlandırılan yöntemler kullanılır. Hooke-Jeeves, Rosenbrock, Nelder-Mead Simplex yöntemleri, yaygın olarak kullanılan yerel dolaysız optimizasyon yöntemleridir (Bandler, 1989). Bu yöntemler başlangıç noktasına bağlı olarak farklı optimum noktalara yakınsar.

Dolaysız yöntemlerin ikinci ana grubunu “mutlak optimizasyon yöntemleri” oluşturur. Mutlak optimizasyon yöntemleri verilen bir çözüm uzayı içerisinde amaç fonksiyonun başlangıç noktasından bağımsız olarak mutlak en küçük veya en büyük olduğu noktayı arar. Elde edilen sonucun gerçek mutlak optimum olup olmadığını sınıyacak herhangi bir analitik yöntemin olmaması nedeniyle, bu yöntemler mutlak optimumun bulunması için istatistiksel yöntemlerden faydalanır (Lewis, 2000). Mutlak ve dolaysız algoritmalar, esnek ve yüksek performanslı çözümler sağlar. Yapay sinir ağları, genetik algoritma ve diğer evrimsel hesaplama yöntemleri, yapay ısıl işlem, yapay bağışıklık algoritması gibi istatistiksel algoritmalar, bu algoritmalarından bazılarıdır. Elektrik motorlarının tasarımı doğrusal olmayan çok değişkenli ve çok hedefli, kısıtlamalı bir optimizasyon problemidir. Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bazı temel yöntemler, sınırlamasız doğrusal olmayan problemler için geliştirilmiş yöntemlere dayanmaktadır. Bu tarz problemlerinin çözümü, bir başlangıç çözümü X_0 belirleyip, bunu optimal koşullar sağlanıncaya kadar

belirli bir araştırma yönünde ve belirli bir adım büyüklüğüyle değiştirmeye dayanmaktadır. Araştırma yönü, $F(X)$ fonksiyonun X_i noktasındaki değerinin gradyanına bakarak bulunmaktadır. Bu yöntemlerin sınırlamalı problemlere uygulanabilmesi için sınırlamalı problemlerin ceza, bariyer ve hata fonksiyonlarının kullanılmasıyla sınırlamasız problemlere dönüştürülmesi yaygın bir yaklaşımdır (Smith ve Coit, 1995).

Makine boyutlarında, hem malzeme ekonomisi hem de küçük ve hafif motorlara duyulan ihtiyaç sonucu ortaya çıkacak azalma zorunluluğu ise ısınma problemi üzerinde durulmasını gerektirmektedir. Çünkü azalan malzeme hacmi nedeniyle eşdeğer güçte daha büyük hacimdeki bir motora kıyasla ısı artışı daha hızlı olacak, öte yandan ısı aktarım yüzey alanlarının azalması nedeniyle soğuma güçleşecektir. Motordaki sıcaklık dağılımının bilinmesi, bu nedenle gerek tasarımcı gerek kullanıcı açısından büyük önem taşır. Motorun karmaşık bir geometriye sahip olması, kullanılan malzemelerin farklı ısı özellikler taşıması, ısı kaynaklarının, yani kayıpların makine içinde dağılmış olması ve motorun hareketli parçalar içermesi nedeniyle sıcaklık ölçümünü sensörler aracılığıyla doğrudan yapmanın maliyeti çok yüksektir. Bunun yanı sıra rotora yerleştirilmiş bir sensör yüksek merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında zarar görebilir. Ayrıca ölçü aletlerinin büyük zaman sabitleri sıcaklık değişiminin hızlı olduğu kısa devre, faz kaybı gibi durumlarda sıcaklıktaki değişimi algılamakta geç kalacaktır. Bu nedenle araştırmacılar motorun ısı davranışını temsil edebilecek modeller üzerinde yoğunlaşmıştır. Elektrik makinelerinin ısı analizinde kullanılan modeller belli başlangıç koşulları altında makinenin ısı davranışını, makinedeki sıcaklık dağılımını öngörebilmek için kullanılır. Bir ısı modelin kurulmasında öncelikle elektrik makinesi, yük ve çevre koşullarının fiziksel bir modeli oluşturulur. Daha sonra bu fiziksel model matematiksel olarak ifade edilecek ve sayısal çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak çözümleme yapılacaktır. Doğrudan sıcaklık ölçümünün maliyetini yükselten faktörler, modelleme aşamasında da yüksek bilgisayar donanım maliyetleri ve çözümleme sürecinin çok uzun olması biçiminde kendini gös-

terir. Isıl analizin, dolayısıyla motor korumasının maliyetinin azaltılabilmesi için, motor davranışını en iyi biçimde temsil edebilen, kullanıcının ihtiyacını karşılamakta yeterli, ancak bunların yanı sıra mümkün olduğunca sadeleştirilmiş ısı modellerin oluşturulması gereklidir. Elektrik makinelerinin ısı analizinde kullanılan modeller, sayısal alan çözümüne dayalı modeller ve toplu parametrelili ısı eşdeğer devre modelleri olarak iki ana grupta toplanır.

Bu çalışmada asenkron motorda ısı artışının belirlenebilmesi için, motorun ısı davranışını temsil edecek bir ısı eşdeğer devre modeli oluşturmak ve bu modeli, motorun çok amaçlı Yapay Isıl İşlem algoritması kullanılarak gerçekleştirilen tasarım optimizasyonu sürecine birleştirmek amaçlanmıştır.

Yöntem

Isıl modelleme

Elektrik makinelerinde ısı aktarımı iletim, taşınım ve radyasyon aracılığıyla olur. Makinenin katı parçaları için iletim yöntemi baskındır, soğutucu akışkanlardaki aktarım ise taşınım yöntemiyle olmaktadır. Işınım ısı iletimi elektrik makinelerinde, sıcaklıkların çok yüksek derecelere ulaşmaması nedeniyle ihmal edilebilir (Boglietti ve Cavagnino, 2006).

Karkas ve dış ortam arasında taşınım ve yayılım yoluyla ısı aktarımı olur. Karkas kayıpsız olarak kabul edilir. Stator sac paketi ve karkas arasında temel olarak iletim mekanizması geçerlidir. Boyunduruk ve dişlerden oluşan stator sac paketi makinada demir kayıplarının meydana geldiği bölgedir. Bu kayıplar ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Stator sargıları ile sac paketi ve sargı başları arasında ısı, iletim mekanizmasıyla aktarılır. Stator oluk sargıları ve sargı başlarındaki bakır kayıpları ile bu bölgede büyük miktarlarda ısı enerjisi üretilir. Stator sargıları ile hava aralığı, sargı başları ile de kapak boşluğu havası arasında taşınım mekanizması geçerlidir. Kapak boşluğu havası temas halinde olduğu tüm yüzeylerle (motor yan kapakları, rotor kısa devre halkası, rotor ve stator manyetik devreleri) taşınım yoluyla ısı alışverişi yapar.

İletim, taşınım ve yayılım yoluyla ısı aktarımı ile elektriksel büyüklükler arasında, sürekli halde, Poisson ve Laplace denklemlerine dayanan bir benzeşim kurmak mümkündür. Bu modelleme yönteminde motor belirli sayıda alt kısma ayrılarak, her bir alt kısmın ısı direnci ve ısı kapasitesi geometriye, boyutlara ve kullanılan malzemenin türüne göre hesaplanır (Mellor, 1991; Boglietti vd., 2003). Böylece motorun ısı davranışını temsil eden bir elektriksel eşdeğer devre oluşturularak Kirchoff yasaları uyarınca bu devrenin çözümü yapılır.

Çalışmada 2.2kW, 380V, p=4 kutuplu tamamen kapalı tipte bir asenkron motorun sıcaklık dağılımını belirlemek üzere bir ısı model oluşturulmuş, bu modelden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmayla doğrulanmıştır.

Asenkron motorun sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için modeldeki ısı kaynaklarının, yani motor kayıplarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunu için motorda boşa çalışma, kısadevre ve yükleme deneyleri yapılmıştır. Sürtünme ve vantilasyon kayıplarının belirlenebilmesi için $P_0=f(V_{10}^2)$ eğrisinden faydalanılmıştır.

Gövdeyle ortam arasında doğal konveksiyonla ısı aktarım direncini belirlemek için stator sargıları anma akımının % 75'i değerinde doğru akımla beslenmiş, gövdenin dış sıcaklığı infrared termometre ile ölçülmüştür. Gövdedeki sıcaklık değişiminin 30 dakika içerisinde 0.5 °C den az olduğu durumda motor rejim sıcaklığına oturmuş kabul edilerek, bu anda ölçülen stator sargılarında harcanan güç P_{DC} , ortam sıcaklığı T_o ve gövde sıcaklığı T_g kullanılarak R_o direnci hesaplanmıştır.

$$R_o = \frac{T_g - T_o}{P_{DC}} \quad (2)$$

Bunun haricinde karkasla dış ortam, rotor ve stator sargıları ile hava aralığı ve kapak boşluğu havası arasındaki taşınım ısı dirençleri ve tüm iletim ısı dirençleri ve ısı kapasiteler hesap yoluyla elde edilmiştir. Model 8 düğümünden oluşmaktadır ve her bir düğüm bir makine bileşeninin ortalama sıcaklığını temsil eder. Isıl eşdeğer

devre parametrelerinin bulunmasıyla, asenkron motorun geçici ısı rejim ve sürekli durumdaki sıcaklık artışı ve dağılımı aşağıda verilen denklemin çözümüyle elde edilir.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{T_j - T_i}{R_{ji}} + Q_i \quad i,j=1,2,\dots,8 \quad (3)$$

T_i ve T_j i. ve j. düğümlerin sıcaklıklarını, R_{ji} bu düğümleri birbirine bağlayan ısı eşdeğer direncidir. Q_i , i. düğüm tarafından temsil edilen motor bileşeninde meydana gelen kayıp ve C_i bu motor bileşeninin ısı kapasitesidir.

Motorun değişik kısımlarındaki sıcaklık artışı belirlemek üzere PicoTech TC-08 veri kayıt cihazı, sensör olarak K tipi ısı çift kullanılmaktadır. Sensörlerin oluk sargıları ve sargı başlarına yerleştirilebilmesi için motor yeniden sarılmış, oluk içlerine toplam 5 adet, sargı başlarına iki adet sensör yerleştirilmiştir. Boyunduruk sıcaklığı gövde üzerinde uygun derinlikte açılmış iki yuvaya yerleştirilmiş sensörlerle ölçülmüştür. Mil ve gövde sıcaklıklarının ölçümü için infrared termometre, soğutucu hava hızının belirlenebilmesi için anemometre kullanılmıştır.

Yapay ısı işlem yöntemi

Asenkron motorun çok amaçlı optimizasyonu için yapay ısı işlem algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem ismini metalürjide malzemelerin kafe yapısını iyileştirmek üzere kullanılan, belirli bir sıcaklığa kadar ısıtma ve sonra kontrollü bir biçimde soğutma işleminden almıştır. Isıtma kristal yapıdaki atomların başlangıçtaki minimum enerji seviyelerinde kopmasına ve daha üst enerji seviyeleri arasında rasgele geçişler yapmasına yol açarken, yavaş ve kontrollü soğutma başlangıçtaki enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine, dolayısıyla daha kararlı bir konuma ulaşma şansını arttırmaktadır. Yapay ısı işlem algoritmasında optimizasyon probleminin olası çözümleri, katının belli bir enerji seviyesinde moleküllerin hız, pozisyon, oryantasyon vb. özellikleri tarafından belirlenen durumlarına, söz konusu çözümler için amaç fonksiyonunun aldığı değerler ise enerji seviyelerine karşılık gelmektedir (Tablo 1). Atomların mümkün olan en düşük enerji seviyesine ulaş-

ması, problemin mutlak optimum noktasının bulunması anlamına gelmektedir (Kirkpatrick vd., 1983; Wakayama, 2007).

Tablo 1. Yapay ısıtma işlem ve ısıtma işlem arasındaki benzerlik

ISIL İŞLEM	YAPAY ISIL İŞLEM
Bir enerji seviyesinde moleküllerin bulunduğu hal	Optimizasyon probleminin potansiyel çözümleri
Enerji seviyeleri	Söz konusu çözümler için amaç fonksiyonunun aldığı değerler
Atomların mümkün olan en düşük enerji seviyesine ulaşması	Mutlak optimum noktası

Yapay ısıtma işlem algoritması ardışıl iyileşmeler esasına dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Ardışıl iyileştirme stratejisinde belirli bir başlangıç noktasından itibaren, bu noktadaki amaç fonksiyonunun değerinden daha iyi bir değer üretecek yeni bir noktaya ulaşmaya kadar düzenlemeler yapılır. Ulaşılan yeni nokta bir sonraki araştırma işlemi için başlangıç noktasıdır. Çözüm uzayında amaç fonksiyonunun değerini iyileştirecek noktaları araştırma işleminde Monte Carlo (MC) yöntemleri kullanılabilir. En basit haliyle MC tamamiyle rasgele olarak atılan adımlar sonucu elde edilen örneklerden ibarettir. Tek koşul her bir adımda uzayın farklı bir bölgesinin araştırılıyor olmasıdır. 1953 yılında Nikolay Metropolis tarafından önerilen Metropolis Monte Carlo (MMC) araştırma yöntemi ise, araştırma uzayında atılan adımların etki örnekleme kuralına uygun olarak yapılmasını öngörür (Kirkpatrick, 1983). Algoritmanın ilk adımı, uygun olan veya olmayan rasgele bir başlangıç çözümü $f(X_0)$ seçilmesidir. $f(X_0)$ çözümünden hareketle, bu çözümünün komşuluğunda bulunan farklı X noktaları arasında, amaç fonksiyonunun değerini en az yapan bir nokta aranacaktır. Belirli bir optimizasyon aşamasında X^* ve bunun komşuluğunda bulunan N adet olası çözüm noktasında amaç fonksiyonunun alabileceği ortalama değer, örnekleme MMC algoritmasıyla yapılması durumunda elde edile-

bilir. Başlangıç noktasında amaç fonksiyonunun değerinin (enerji seviyesinin) hesaplanmasının ardından rasgele bir hareketle yeni bir çözüm belirlenir ve ilk çözüme kıyasla “enerji seviyesi” daha düşükse (örneğin bir minimizasyon uygulamasında, amaç fonksiyonunun aldığı değer, bir önceki değerinden daha düşükse), yeni çözüm olarak kabul edilir. Eğer yeni çözümün enerji seviyesi öncekinden daha yüksekse, kabul edilip edilmeyeceği aşağıda verilmiş olan “Metropolis Kabul Kriteri” ile belirlenir.

$$P_{kabul} = \min(1, e^{-\Delta F / T}) \quad (4)$$

P_{kabul} , atılan bir adım sonucu ulaşılan noktanın yeni başlangıç noktası olarak kabul edilme olasılığını göstermektedir. ΔF amaç fonksiyonlarının başlangıç noktası ile gelinen noktada aldığı değerler arasındaki farka eşittir. T ise “sıcaklık” olarak adlandırılan birimsiz bir kontrol parametresidir.

Yapay Isıtma İşlem algoritmasının literatürde en yaygın kullanımı ASA olarak bilinen bir paket programdır. Tablo 2. de düşük stator sargı sıcaklığı için, bu çalışmada kullanılan algoritmanın ASA ve Matlab Pattern Search araç kutusu kullanılarak uygulanan örüntü araştırma yöntemi ile kıyaslaması verilmiştir. Tabloda t işlem süresi, T_{SARGI} stator sargı sıcaklığı, M_{YV} kalkış momenti, I_{YV} kalkış akımı, I_{μ} mıknatıslanma akımı, M_n anma momentidir. Kalkış iyiliği kalkış momentinin kalkış akımına oranıdır. Bu tablodan görüldüğü üzere her üç algoritmayla elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır. Isıtma işlem algoritmasının rastlantısal sayılara dayalı işlem yapıyor olması nedeniyle farklı zamanlarda çok az da olsa farklı sonuçlar vermesi mümkündür. Dolayısıyla sonuçlar arasındaki fark anlamlı değildir.

Asenkron motor tasarımında birbiriyle çelişen beklentilerle karşılaşmaktadır. Örneğin; düşük sıcaklık artışı ve küçük hacim beklentisi birbiriyle çelişmektedir. Çünkü azalan malzeme hacmi nedeniyle eşdeğer güçte daha büyük hacimdeki bir motora kıyasla sıcaklık artışı daha hızlı olacak, öte yandan ısı aktarım yüzey alanlarının azalması nedeniyle soğuma güçleşecek-

Tablo 2. Optimizasyon yöntemlerinin kıyaslanması

	Mevcut tasarım	Yapay ısı işlem	ASA	PS
İşlem sayısı		2926	38286	1403
t (s)		17	191	12
T _{SARGI} (°C)	114.91	109.10	109.11	109.11
Verim (%)	81.4	82.91	82.91	82.93
M _{YV} (N.m)	31.16	39.07	39.076	39.07
I _{YV} (A)	20.565	23.744	23.748	23.748
Kalkış iyiliği	1.511	1.645	1.645	1.645
Kütle (kg)	7.6	5.878	5.873	5.873
I _μ (A)	1.991	1.991	2.0281	2.0101

tir. Yüksek güç beklentisiyle tasarlanmış bir motor kompaktlık gereksinimini karşılayamayacaktır. Motor momentinin akımla orantılı olması nedeniyle düşük kalkış akımında yüksek kalkış momenti elde etmek, ancak yüksek rotor dirençleriyle mümkündür. Ancak rotor direncinin yüksek olması motorun verimini düşürecektir. Demir kayıplarının azaltılması ve manyetik doymanın engellenmesi dişler ve boyunduruktaki manyetik akı yoğunluğunun azaltılmasıyla mümkündür. Diş genişliği artırılarak manyetik akı yoğunluğu azaltılıp mekanik dayanıklılık artırılabilir ancak bu durumda oluk derinliği ve buna bağlı olarak kaçak reaktans artacaktır. Sabit oluk genişlik ve derinliği için boyunduruk genişliğini arttırmak doyma riski ortadan kaldıracak ve demir kayıplarını azaltacak, ancak makine dış çapının ve kullanılan malzeme miktarı ve ağırlığının artmasına yol açacaktır. Bu durumda tek bir optimum noktadan bahsetmek mümkün değildir. Çok amaçlı optimizasyonda hedef, tasarımcı ve/veya kullanıcının belirli talepleriyle en uyumlu çözüm grubunu bulmaktır. Bu çözümler Pareto-Optimal çözümler olarak adlandırılır (Czyzag vd., 1998; Luizzi vd., 2003). M adet amaç fonksiyonu içeren bir minimizasyon problemi için eğer bütün $j=1,2,\dots,M$ değerleri için $F_j(y) < F_j(x)$ eşitsizliğini sağlayan bir y çözümü yoksa ve en az bir j için $F_j(y) \leq F_j(x)$ sağlanıyorsa x çözümü pareto optimal çözüm veya baskın olmayan çözüm olarak adlandırılır. Eğer bütün $j=1,2,\dots,M$ değerleri için $F_j(y) < F_j(x)$ eşitsizliğini sağlayan bir y değeri varsa y çözü-

mü baskın çözümdür ve kabul edilme olasılığı 1 dir. Hiçbir j değeri için bu eşitsizlik sağlanıyorsa bu durumda y çözümü 1 den küçük bir olasılıkla kabul edilebilir. y bir baskın olmayan çözüm ise, yani en az bir j değeri için $F_j(y) \leq F_j(x)$ elde ediliyorsa, bu durumda kabul edilme olasılığı λ_j normalize edilmiş rastlantısal sayılar olmak üzere (5) ile hesaplanır.

$$P = \min(1, \min(e^{\lambda_j((F_j(y)-F_j(x))/T)})) \quad (5)$$

Bu çalışmada kullanılan algoritmada baskın çözümler aranmaktadır. Eğer y çözümü herhangi bir j değeri için $F_j(y) < F_j(x)$ eşitsizliğini sağlamıyorsa, y noktasının kabul edilmesi bütün j değerleri için aşağıdaki eşitsizliğin sağlanmasına bağlıdır (Lehnert vd., 2008).

$$P_{kabul} = e^{-((F_j(y)-F_j(x))/T)} > PP \quad (6)$$

Asenkron motorlarda verim, ağırlık, maliyet, üretim ve işletme maliyeti, kalkış iyiliği, güç katsayısı, dişler ve boyunduruktaki akı yoğunluğu, kayma vb. performans büyüklükleri amaç ve/veya kısıtlama fonksiyonu olarak seçilebilir. Tablo 3, çeşitli amaç fonksiyonları ve kısıtlamalar için elde edilen sonuçları göstermektedir. Optimizasyon işlemi sabit güç ve moment için yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonuçları Anma yükünde sıcaklık dağılımının belirlenmesi

Motor anma yükünde çalıştırılarak, ısı rejime oturuncaya kadar çeşitli noktalardaki sıcaklık değerleri sıcaklık veri kaydedici ile ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları, ısıl modelden elde edilen sonuçlar ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak modelin doğruluğu sınanmıştır.

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) için FEMM 4.2. yazılımı kullanılmıştır. 2 boyutlu sonlu eleman analizinde stator oluk sargısı ve sargı başını ayrı ayrı modellemek mümkün olmadığı için, SEA stator oluk sargısı sıcaklığını belirlemek üzere yürütülmüştür. Tablo 4'te motorun anma yükü, Tablo 5'te ise boşa çalışma durumu için ölçüm

ve ısı model ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen değerler gösterilmiştir.

Tablo 3. Optimizasyon sonuçları

Amaç	Sıcaklık	Sıcaklık ve ağırlık	Sıcaklık verim ve ağırlık
Kısıtlama	-	$M_{YV}>35$	$M_{YV}>35, I_{\mu}<3$
T_{SARGI} (°C)	108.4	109.2	109.5
Verim (%)	82.9	82.9	83
M_{YV} (Nm)	30.656	36.773	36.735
I_{YV} (A)	21.04	23.02	23.023
Kalkış iyiliği	1.457	1.595	1.595
Kütle (kg)	5.892	5.893	5.892
I_{μ} (A)	1.99	2.028	2.237
M_n (Nm)	18.47	18.65	18.65

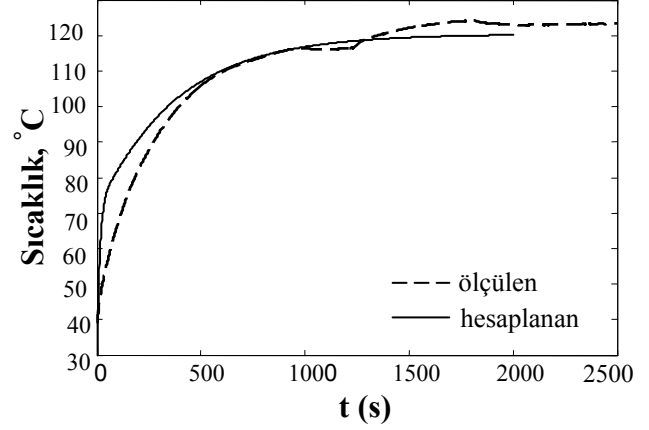
Tablo 4. Anma çalışmasında sıcaklık dağılımı

	Isıl Model (°C)	Ölçüm (°C)	SEA (°C)
Gövde	80.49	79	79
Stator boyunduruğu	94.88	95.4	94.67
Stator dışleri	97.24	-	101
Oluk sargısı	113.59	112.16	113.57
Sargı başı	122.47	123.34	-
Kısadevre kafesi	151.74	-	154.94
Rotor boyunduruğu	150.57	-	154.94

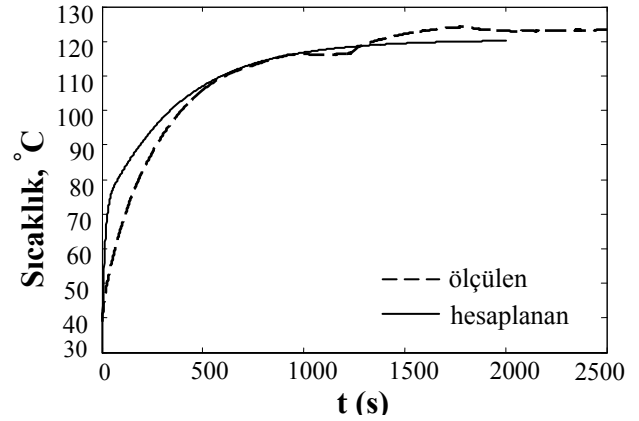
Tablo 5. Yüksüz çalışmada sıcaklık dağılımı

	Isıl Model (°C)	Ölçüm (°C)	SEA (°C)
Gövde	43.385	43	43
Stator boyun-duruğu	51.28	51	50.484
Stator dışleri	52.05	-	52.58
Oluk sargısı	58.01	58.03	58.76
Sargı başı	60.95	60.67	-
Kısadevre kafesi	56.26	-	55.26
Rotor boyunduruğu	56.21	-	55.56

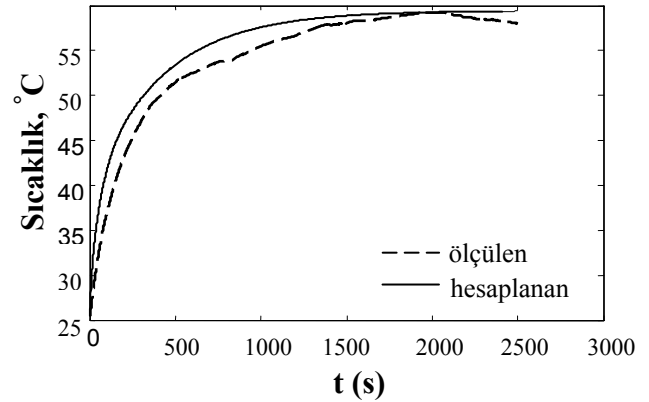
Şekil 1-2’de anma yükünde, Şekil 3-4’te yüksüz çalışmada stator oluk içi sargısı ve stator sargı başı için hesap yoluyla elde edilen ısı geçici rejim davranışları gösterilmekte ve bu sonuçlar deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmaktadır



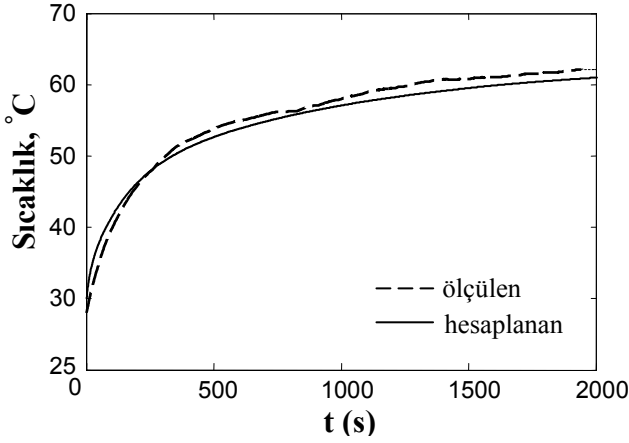
Şekil 1. Anma yükünde stator sargısının ısı geçici rejim davranışı



Şekil 2. Anma yükünde stator sargı başının ısı geçici rejim davranışı



Şekil 3. Boşta çalışmada stator sargısının ısı geçici rejim davranışı



Şekil 4. Boşta çalışmada stator sargı başının ısı geçici rejim davranışı

Sonuçlar

- 1)Asenkron motorun hem sürekli halde hem ısı geçici rejimdeki sıcaklık dağılımını yüksek doğrulukla temsil edebilen bir ısı model oluşturulmuştur.
- 2)Oluşturulan ısı modelin motorun tasarım optimizasyonu sürecine entegre edilmesiyle, mevcut tasarıma kıyasla daha düşük malzeme kullanımıyla, yüksek verim ve kalkış iyiliğine sahip ısı açıdan daha az zorlanan bir motor tasarımı elde edilmiştir.
- 3)Yazılan yapay ısı işlem algoritması, çoklu amaç ve kısıtlama fonksiyonlarını herhangi bir ara işleme (normalizasyon, ağırlık, ceza ve bariyer katsayılarının hesabı vb.) gerek kalmadan işleyebilmektedir. Dolayısıyla bu işlemlerden kaynaklanabilecek hataların da önüne geçilmiş olmaktadır.

Kaynaklar

- Bandler, J.W., (1989). Optimization methods for computer aided design, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, **MTT-17**, 8, 533-549.
- Boglietti, A. ve Cavagnino, A., (2006). Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors, *IEEE Transaction on Industry Applications*, **42**, 9, 688-693.
- Boglietti, A., Cavanino, A., Stanton, D.A., Lazzeri, M. ve Pastorelli, M., (2003). Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analy-

- sis, *IEMDC 2003 Conference Preview*, 1-4 June 2003, Madison, Wisconsin, USA
- Cho, D.H., Jung, H.K. ve Lee, C.G., (2001). Induction motor design for electrical vehicles using a niching genetic algorithm, *IEEE Transaction On Industry Applications*, **37**, 994-999.
- Czyzak, P. ve Jaszkievicz, J., (1998). Pareto simulated annealing, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, **7**, 34-47.
- Fouladgar, J. ve Chauveau, E., (2005). The influence of the harmonics on the temperature of electrical machines, *IEEE Transaction on Magnetics*, **41**, 5, 1644-1647.
- Jawad, F. ve Sharifian, M.B., (2006). Optimal design of induction motor for an electric vehicle, *European Transaction on Electrical Power*, **16**, 15-33.
- Kirkpatrick S, Gellat C.D., Vecchi M.P., (1983). Optimization by simulated annealing, *SCIENCE*, **220**, 4598, 671-681.
- Lehnert, R. ve Abdelfatteh, H., (2008). Multi-case multi-objective simulated annealing (MC-MOSA): New approach to adapt simulated annealing to multi-objective optimization, *International Journal of Information Technology*, **4**, 3, 197-205.
- Lewis, R.M., (2000). Direct search methods: Then and now, *ICASE Report No:2000-26*, Virginia.
- Luizzi, G., Lucidi, S., Parasiliti, F. ve Villani, M., (2003). Multi-objective optimization techniques for the design of induction motors, *IEEE Transaction on Magnetics*, **39**, 3, 1261-1264.
- Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R., (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design, *IEE Proceedings B*, **138**, 5, 205-218.
- Önbilgin, G., (1993). Endüstride elektrik motorlarının enerji tüketimi açısından verimli kullanımına ilişkin yöntemler, *EMO 2. Elektromekanik Sempozyumu*, Bursa.
- Smith, A.J.E. ve Coit, D.W., (1995). Handbook of evolutionary computation section c 5.2: Penalty functions, *A Joint Publication of Oxford University Press and Institute of Physics Publishing*, 1-12, Pennsylvania.
- Türkiye Elektrik İstatistikleri Özeti, (1993). Türkiye Elektrik Kurumu, Ankara.
- Wakayama, C., Simulated annealing algorithms, www.courses.washington.edu, 20/11/2007.
- Ingber, L., Adaptive simulated annealing program code, www.ingber.com, 31.01.2007.