

ÇOK KRİTERLİ BULANIK GENETİK ALGORİTMA İLE DALGIÇ ASENKRON MOTORLARIN TASARIM OPTİMİZASYONU

Mehmet ÇUNKAŞ ve Abdullah ÜRKMEZ*

Elektronik-Bilgisayar Eğitimi, Teknik Eğitim Fakültesi, 42003, Selçuk Üniversitesi, Konya

mcunkas@selcuk.edu.tr

*Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 42031, Selçuk Üniversitesi, Konya

urkmez@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 09.10.2007; Kabul/Accepted: 29.04.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, dalgiç asenkron motorların tasarım optimizasyonu çok kriterli genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirildi. Motor tasarımı, bulanık kümeler ve bulanık karar yapma kavramlarından faydalanarak çok kriterli bulanık optimizasyon problemi olarak formüle edildi ve genetik algoritmalar ile çözüldü. Optimal tasarımın geçerliliğini doğrulamak için iki boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanıldı. Optimizasyon sonuçları amaçlanan yöntemin etkisini ve başarısını gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli optimizasyon, dalgiç motor, genetik algoritmalar, sonlu elemanlar yöntemi.

DESIGN OPTIMIZATION OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS by MULTIOBJECTIVE FUZZY GENETIC ALGORITHM

ABSTRACT

This paper presents multiobjective fuzzy genetic algorithm optimization approach to a submersible motor design. Utilizing the concept of fuzzy sets and convex fuzzy decision making, the motor design task is formulated as a multiobjective fuzzy optimization problem and solved using a genetic algorithm. The two-dimensional Finite Element Method (FEM) is then used to confirm the validity of the optimal design. The optimization results show the effectiveness and achievement of the proposed method.

Keywords: Multiobjective fuzzy optimization; submersible motor; genetic algorithms; finite element method.

1. GİRİŞ (INTRUDUCTION)

Elektrik makinelerinin tasarımında ana konular elektrik, dielektrik, magnetik, termal ve mekanik olarak kısımlara ayrılabilir. Çoğu motor parametreleri motor performansını lineer olmayan bir şekilde etkilemektedir. Bu yüzden tasarım süreci hala karmaşıklığını sürdürmektedir [1]. Böyle durumlarda standart lineer olmayan programlama teknikleri kullanılması hem çok zaman alıcı ve hem de yetersiz kalmaktadır. Bazı araştırmacılar standart programlama teknikleri kullanarak asenkron motor tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [2-4]. Son zamanlarda elektrik makinelerinin tasarım

optimizasyonunda genetik algoritmalar etkili bir şekilde kullanılmaya başlandı [5-8]. Genetik algoritmaların standart lineer olmayan programlama tekniklerine göre bir üstünlüğü yerel minimum yerine küresel minimumu bulabilmesidir. Diğer bir üstünlüğü ise matematik fonksiyonlarda, her zaman kolay elde edilemeyen türeve gerek duymaması olarak belirtilebilir [9].

Elektrik makinelerinin tasarım optimizasyonu, farklı amaçları aynı anda dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Örneğin motor boyutları küçük olmalı, maliyeti düşük olmalı, verimi ve güç faktörü yüksek olmalı gibi amaçlar sıralanabilir. Bütün bunlar

düşünüldüğünde çok kriterli optimizasyonun önemi ortaya çıkmaktadır.

Literatürde, elektrik motorlarının tasarımında bazı çok kriterli optimizasyon yaklaşımları amaçlandı. Kim ve ark.[10] elektrikli ulaşım araçlarında kullanılan indüksiyon motorun çok kriterli optimal tasarımını, ilerletilmiş evrim stratejisi kullanarak gerçekleştirdiler. Mirzaeian ark. [11] anahtarlamalı relüktans motor için iki amaç fonksiyonu kullanarak, yeni bir çok kriterli optimizasyon metodu sundular. Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonu değerlerini bulanık uzman sistem kullanarak belirlediler. Liuzzi ark. [12] yeni geliştirdikleri çok kriterli optimizasyon yöntemini indüksiyon motorlarına uyguladılar.

Elektrik makineleri tasarımında hem kısıtlar hem de amaç fonksiyonları; eşitlik, eşitsizlik ve bulanık kısıtların karışımından oluşmaktadır. Bu makalede dalgıç asenkron motorun çok kriterli optimizasyonunda esnek ve iyi çözümler üretmek amacıyla, amaç fonksiyonları bulanık kümeler ile ifade edildi. Böylece genetik optimizasyon sürecinde en iyi kromozomun gelecek popülasyonda yer alması için avantaj sağlandı. Motor performansı ve parametrelerin hesaplanmasında eşdeğer devre modeli kullanıldı. Bu modellerde bazı kabuller kullanılarak hesaplamalar yapıldığından hesaplamalarda bir miktar sapmalar meydana gelmektedir. Bu yüzden amaçlanan yöntemi test etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanıldı. Gerçekleştirilen bu çalışmada, Çok Kriterli Bulanık Genetik Algoritmanın (ÇBGA) motor tasarımında iyi sonuçlar verdiği görüldü.

2. ÇOK KRİTERLİ BULANIK OPTİMİZASYON (MULTIOBJECTIVE FUZZY OPTIMIZATION)

Bellman ve Zadeh [13], bulanık amaç, bulanık sınır ve bulanık karar gibi üç temel kavramı dile getirerek, karar yapma sürecinde bu kavramların uygulanabilirliğini gösterdiler. Daha sonra, bazı araştırmacılar [14,15], mühendislik tasarımında çok kriterli bulanık optimizasyonu kullandılar. Bu bölümde çok kriterli bulanık optimizasyon problemi ifade edilerek bulanık karar yapma prensipleri tanımlanacaktır. Genel olarak çok kriterli optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Amaç fonksiyonu $f(x)$ aşağıdaki kısıtları karşılayacak şekilde minimize edilir.

$$\begin{aligned} \text{Min } f(X), \\ h_i(X) &= 0, \quad i=1,2,\dots,m, \\ g_j(X) &\leq 0, \quad j=1,2,\dots,J, \\ X_k^u &\geq X_k \geq X_k^l, \quad k=1,2,\dots,K, \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $f(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)\}$ amaç fonksiyonu vektörü, $h_i(X)$ ve $g_j(X)$ sırasıyla

eşitlik ve eşitsizlik kısıt fonksiyonlarıdır. X_k^u ve X_k^l sırasıyla parametre alt ve üst sınırlarıdır.

Amaç fonksiyonları ve kısıtların bulanıklaştırılması için üyelik fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. Çoğu uygulamalarda, üyelik fonksiyonu şekillerinin problemin çözümünde önemli değişiklikler meydana getirmediği söylenebilir. Yapılan bir çalışmada[16], Linear, tanjant ve üssel gibi değişik üyelik fonksiyonları kullanıldı. Çözüm sonuçlarının üzerindeki etkileri incelendi. Ancak bu fonksiyonların farklı olmasının sonuçlar üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı görüldü.

Bulanık amaç fonksiyonu aşağıdaki üyelik fonksiyonu kullanılarak tanımlanabilir.

$$\mu_{f_i}(X) = \begin{cases} 1 & \text{Eger } f_i(X) \leq f_i^{\min} \\ 1 - 2 \left(\frac{f_i(X) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2 & \text{Eger } f_i^{\min} < f_i(X) \leq f_i^{\text{av}} \\ 2 \left(\frac{f_i(X) - f_i^{\max}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2 & \text{Eger } f_i^{\text{av}} < f_i(X) \leq f_i^{\max} \\ 0 & \text{Eger } f_i(X) > f_i^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

Burada $\mu_{f_i}(X) : \mathfrak{R}^n \rightarrow [0,1]$ ve üyelik fonksiyonu $\mu_{f_i}(X)$ 'nin, reel sayı kümesi olan \mathfrak{R}^n 'in $[0,1]$ kapalı aralığında ifade edilmesi demektir. f_i^{\max} , f_i^{av} ve f_i^{\min} değerleri i . amaç fonksiyonunun sırasıyla maksimum, ortalama ve minimum değerleridir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} f_i^{\min} &= \min_i f_i(X^*), \quad f_i^{\max} = \max_i f_i(X^*) \\ \text{ve } f_i^{\text{av}} &= \frac{f_i^{\min} + f_i^{\max}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Burada X^* , her bir amaç fonksiyonunun kendine özgü çözümüdür.

Kısıtlar için bulanık linear üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır[14].

$$\mu_{g_j}(X) = \begin{cases} 0 & \text{Eger } g_j(X) > b_j + d_j \\ 1 - \left(\frac{g_j(X) - b_j}{d_j} \right) & \text{Eger } b_j \leq g_j(X) \leq b_j + d_j \\ 1 & \text{Eger } g_j(X) < b_j \end{cases} \quad (4)$$

Burada $\mu_{g_j}(X) : \mathfrak{R}^n \rightarrow [0,1]$ ve üyelik fonksiyonu $\mu_{g_j}(X)$ 'nin, reel sayı kümesi olan \mathfrak{R}^n 'in $[0,1]$ kapalı aralığında ifade edilmesi demektir. Eğer $\mu_{g_j}(X)$, 1'e eşit ise üyelik derecesinin en üst mertebesini temsil eder ve $\mu_{g_j}(X)$, 0'a eşit ise üyelik derecesinin en alt mertebesini

temsil eder. Böylece i . kısıt fonksiyonu üyelik derecesi 0 ve 1 aralığında ifade edilmiş olur. Burada d_j her bir bulanık sınır için izin verilen tolerans değeridir.

Bulanık karar yapma (Fuzzy decision making)

Üyelik fonksiyonları kullanılarak amaç fonksiyonları ve kısıtlar bulanık alt kümeler ile tanımlanır. μ_D üyelik fonksiyonu ile karakterize edilen bulanık karar uzayından (D) en iyi çözüm seçilerek optimal karar yapılır. Bu karar aşağıdaki gibi tanımlanır [14].

$$\mu_D(X^*) = \max \mu_D(X), \quad (5)$$

$$\mu_D \in [0,1].$$

Bu aşamada karar verme prensiplerinden birisi kullanılabilir. Bu çalışmada tercih edilen yöntem dış bükey(Convex) karar yapma prensipleri olmuştur. Aşağıda ifade edildiği gibi, dış bükey karar [17] aritmetik ortalama kavramını kullanır ve amaç fonksiyonları ile kısıtları bağıl önemime göre birleştirerek bir çatı oluşturur.

$$D = \alpha f(X) + \beta g(X), \quad (6)$$

Burada α ve β aşağıdaki şartları sağlayan ağırlık faktörleridir.

$$\alpha + \beta = 1 \quad \alpha \geq 0 \quad \beta \geq 0$$

Herhangi bir bulanık optimum küme noktaları için α_i ve β_j ağırlıkları, lineer olarak ağırlıkların toplanması ile oluşur.

$$\alpha_i = \frac{\mu_{fi}}{\sum_{i=1}^n \mu_{fi}} \quad \text{ve} \quad \beta_j = \frac{\mu_{gj}}{\sum_{j=1}^m \mu_{gj}} \quad (7)$$

Böylece dış bükey karar için üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu_D(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_{fi} + \sum_{j=1}^m \beta_j \mu_{gj}, \quad (8)$$

Burada α_i ve β_j aşağıdaki şartları yerine getirmesi gerekir.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^m \beta_j = 1 \quad (9)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\beta_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

Denklem (9) daki çok kriterli bulanık optimizasyon problemi aşağıda verilen tek kriterli optimizasyon problemine dönüştürülmüş olur.

$$\max \mu_D(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_{fi}(X) + \sum_{j=1}^m \beta_j \mu_{gj}(X), \quad (10)$$

$$g_j(X) \leq b_j + d_j \quad j = 1, 2, \dots, m$$

3. TASARIM OPTİMİZASYONUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ (IMPLEMENTATION OF THE DESIGN OPTIMIZATION)

3.1. Tasarım Optimizasyonu (The Design Optimization)

Öncelikle tasarımın iyi olup olmadığına karar verebilmek için amaç fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Amaç fonksiyonu motorun bütün fiziksel ve geometrik boyutlarını kapsayacak şekilde tanımlanmalıdır. Ayrıca amaç fonksiyonuna, tasarımın genel standartları ve müşteri istekleri doğrultusunda belirlenecek kısıtlar da dâhil edilmelidir. Bu çalışmada dalgıç asenkron motorun maliyeti ve momentini amaç fonksiyonu olarak kullanıldı.

Birinci amaç fonksiyonu: Motor maliyetidir. Maliyeti teşkil eden unsurlar saç, sargı bakırları, motor bilezik ve montaj maliyetleri olarak düşünülebilir. Buna göre motorun geometrik yapısı dikkate alınarak maliyeti hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir [18].

Demirin ağırlığı, W_{Fe} :

$$W_{Fe} = \frac{L_1 S F D_o^2 P_{fe}}{4} \quad (11)$$

Stator sargıları ağırlığı, W_{sw} ,

$$W_{sw} = L_1 S_1 A_{1m} f_{ew} P_{sw}, \quad (12)$$

ve rotor iletkenleri ağırlığı, W_{rw} ,

$$W_{rw} = P_{rw} \left\{ \frac{\pi w_a (D_r^2 - (D_r - 2w_r)^2)}{2} + S_2 A_b (L_2 - 2w_a) \right\} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Montaj maliyeti toplam maliyetin %20 si olarak düşünülebilir. Böylece motorun toplam maliyeti yani amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_{total} = W_{Fe} Fe_{cost} + (W_{sw} + W_{rw}) Cu_{cost} + C_p \quad (14)$$

İkinci amaç fonksiyonu: Nominal momenttir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [19].

$$T_n = \frac{60}{2\pi n_1} m \frac{V_s^2}{\left(R_1 + \tau_1 \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + \tau_1 X_2)^2} \frac{R_2}{s} \quad (15)$$

Burada τ_1 düzeltme faktörü, n_1 senkron hız ve m faz sayısıdır. Yukarıda verilen amaç fonksiyonları göre yapılacak tasarım optimizasyonda maliyet minimize edilecek ve nominal moment ise maksimize edilecektir. Bulanık amaç fonksiyonları olarak ifade edilecek olan moment ve maliyetin üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\mu_c = \begin{cases} 1 & \text{Eger } C \leq 693 \\ 1 - 2 \left(\frac{C - 693}{945 - 693} \right)^2 & \text{Eger } 693 < C \leq 819 \\ 2 \left(\frac{C - 945}{945 - 693} \right)^2 & \text{Eger } 819 < C \leq 945 \\ 0 & \text{Eger } C > 945 \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{T_n} = \begin{cases} 0 & \text{Eger } T_n \leq 25 \\ 2 \left(\frac{T_n - 25}{200 - 25} \right)^2 & \text{Eger } 25 < T_n \leq 112.5 \\ 1 - 2 \left(\frac{T_n - 200}{200 - 25} \right)^2 & \text{Eger } 112.5 < T_n \leq 200 \\ 1 & \text{Eger } T_n > 200 \end{cases} \quad (17)$$

Çok kriterli bulanık optimizasyonun dış bükey (convex) kararı için denklem (10) kullanılacaktır. Burada bulanık sınırlar olmadığı varsayılarak ($\beta_j = 0$), çok kriterli optimizasyon problemi

aşağıdaki kısıtları sağlayacak şekilde yeniden oluşturulur.

$$\max \mu_D = \alpha_1 \mu_C + \alpha_2 \mu_{T_n} \quad (18)$$

Kısıtlar;

Kayma, $s \leq 0.06$

Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu, $B_{sy} \leq 1.6 \text{ T}$

Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu, $B_{ry} \leq 1.6 \text{ T}$

Stator dişlerindeki akı yoğunluğu, $B_{st} \leq 2 \text{ T}$

Stator dolgu faktörü, $F_f \leq 0.2$

Kalkış akımının nominal akıma oranı, $I_{start}/I_n \leq 4.5$

Güç Faktörü, $\cos\phi \geq 0.79$

Devrilme momentinin nominal momente oranı, $T_p/T_n \geq 1.9$

Optimize edilecek dalgıç asenkron motorun özellikleri Tablo 1 de verilmiştir. Literatürde kullanılan ve motor geometrisini birinci derecede etkileyen değişkenler tasarım parametreleri olarak seçilmiştir.[6]. Bu parametrelerin alt ve üst sınır değerleri ile çözünürlüğü Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Dalgıç asenkron motor özellikleri
(Specifications of submersible induction motor)

Tip	8 inc
Faz sayısı	3
Gerilim	380V
Kutup sayısı	2
Bağlantı tipi	Δ
Güç	75 hp
Frekans	50 Hz
Senkron hız	3000 d/dk

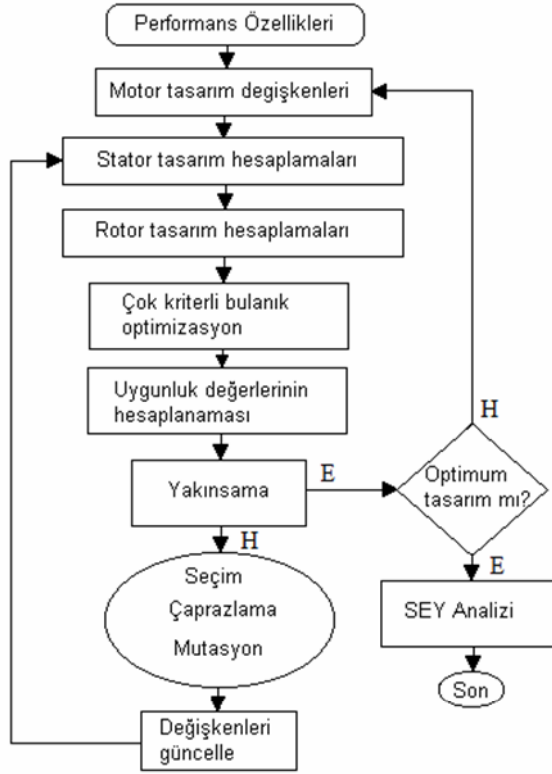
Burada Denklem (18) de görüleceği üzere, çok kriterli optimizasyon problemi tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemine dönüştürülmüş oldu. Elde

Tablo 2. Tasarım parametreleri ve sınırları (Design parameters and their limit values)

	Tasarım parametreleri	Alt sınır	Üst Sınır	Çözünürlük(bit)
X ₁	N ₁ Bir faz sarım sayısı	28	44	12
X ₂	L ₁ Stator demir uzunluğu(cm)	65	80	12
X ₃	w _a Bilezik genişliği (mm)	10	30	12
X ₄	D _i Stator iç çapı (cm)	8	10,5	12
X ₅	h ₁ Stator oyuk yüksekliği (mm)	15	25	8
X ₆	w ₁ Stator oyuk genişliği (mm)	10	15	8
X ₇	g Hava aralığı (cm)	0,04	0,08	12
X ₈	e Kapalı rotor oyuğunun hava aralığına olan mesafesi (cm)	0,03	0,065	8
X ₉	r _b Rotor çubuk çapı (mm)	7,5	10	8
X ₁₀	D _o Stator dış çapı (cm)	18	18	8

edilen bu amaç fonksiyonu değişik optimizasyon teknikleri kullanılarak çözülebilir. Dalgıç asenkron motorun lineer olmayan yapısı nedeniyle karmaşıklaşan bu problemin çözümü genetik algoritmalarla daha kolay yapılabilir. Bu nedenle problemin çözümünde genetik algoritmalar tercih edildi.

Çok kriterli bulanık genetik algoritmanın (ÇBGA) akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Aşağıda algoritmanın her bir adımı açıklanacaktır.



Şekil 1. Çok kriterli bulanık genetik algoritma (ÇBGA) optimizasyonu (The flowchart of multiobjective fuzzy GA optimization)

Adım 1

Başlangıçta Motor özellikleri ve tasarım parametreleri sınırları belirtilir. Ayrıca popülasyon sayısı, mutasyon ve çaprazlama oranı gibi genetik algoritma parametreleri de girilerek optimizasyon süreci başlatılır. Başlangıç popülasyonu rastgele ikilik sayılarla oluşturulur. Tablo 2 de gösterilen her bir tasarım parametresi popülasyon içinde yer almaktadır. Bir popülasyonda bir bireyin toplam uzunluğu 100 bit den oluşmaktadır.

Adım 2

Stator ve rotor tasarım değişkenleri hesaplanır. Denklem (16), (17) ve (18) kullanılarak her bir popülasyondaki bireylerin üyelik dereceleri belirlenir. Ayrıca kısıtlara bakılarak her bir popülasyonda kaç tane sınır aşımı meydana geldiği tespit edilir.

Adım 3

Uygunluk fonksiyonu popülasyon içerisindeki her bir bireyin uygunluğunu ölçer. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlandı.

$$\mu_{Di} = \begin{cases} \mu_{Di} - P(g_j(x)) & \text{Eger } \mu_{Di} - P(x) > 0 \\ 0 & \text{Eger } \mu_{Di} - P(x) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Burada i . popülasyonun üyelik derecesi μ_{Di} dir ve $P(x)$ ceza fonksiyonudur. Ceza fonksiyonu kullanılarak sınırlar kaldırılır ve kısıtlı problemler kısıtsız problemlere dönüştürülür. Buna göre ceza fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P(x) = \frac{1}{r} C_T \mu_{Di} \quad (20)$$

Burada r toplam kısıt sayısını ve C_T sınırı aşan toplam kısıt sayısını göstermektedir. Sınırı aşan herhangi bir kısıt olmadığı zaman Denklem (19)'daki ceza fonksiyonu etkin değildir. Ancak sınırı aşan herhangi bir kısıt olduğu durumda etkin hale gelir. Böylece kısıtları aşan kısımda meydana gelen çözümlerden de popülasyona dâhil edilerek daha iyi sonuçlar alınmaya çalışılmaktadır.

Adım 4

Popülasyondaki her bir bireyin uygunluk değeri bir önceki adımda hesaplandı. Bu adımda ise seçim mekanizması işletilir. Genetik algoritmalarda seçimdeki amaç, popülasyon içerisindeki iyi bireylerin bir sonraki nesilde yer almasını sağlamaktır. Başka deyişle tabiat şartlarına uyum sağlayan hayatta kalır, sağlayamayan ölür. Bu çalışmada seçim yöntemi olarak Rulet tekerleği kullanıldı.

Adım 5

Seçim işlemi yapıldıktan sonra çaprazlamaya geçilir. Çaprazlama genetik algoritmanın önemli bir operatörüdür. Mevcut popülasyondan iki adet birey alınır ve rastgele bir çaprazlama noktası belirlenir. Bu noktadan itibaren bireylerin 'bit'leri karşılıklı olarak yer değiştirir. Daha sonra oluşan bu iki yeni birey popülasyona dâhil edilir. Bu çalışmada tek noktalı çaprazlama yöntemi kullanıldı.

Adım 6

Çaprazlamadan işleminden sonra genetik algoritmanın başka bir operatörü olan mutasyon uygulanır. Popülasyon içerisindeki bireylerin herhangi bir 'bit' i rastgele seçilir. Seçilen 'bit' 1 ise 0 yapılır veya 0 ise 1 yapılır. Aynı bireyde birden fazla mutasyon meydana gelebilir. Bu çalışmada 'bit' mutasyonu kullanıldı.

Adım 7

Bu aşamada yeni bir popülasyon meydana getirilmiş oldu. Tekrar ikinci adımı dikkate alarak her bir birey'in uygunluğu değerlendirilir. Optimizasyon

prosedürü, yakınsama testi yapılarak veya önceden verilmiş iterasyon sayısına ulaşip ulaşmadığı kontrol edilerek durdurulur.

Adım 8

Çok kriterli bulanık genetik algoritma (ÇBGA) optimizasyonu tamamlandıktan sonra elde edilen motor parametrelerine göre sonlu elemanlar metodu kullanılarak motorun magnetik analizi yapılır. ÇBGA optimizasyonunda motor parametreleri ve performansı hesaplamaları eşdeğer devre modeli kullanılarak yapılmaktadır. Ancak bu modelin kullanılması bazı temel kabuller nedeniyle hesaplamalarda biraz sapmalar oluşturabilmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle motorun magnetik davranışı hakkında daha gerçekçi bilgiler elde etmek mümkündür. Bu nedenle elde edilen sonuçları test etmek amacıyla motorun magnetik analizi ANSYS paket programı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu aşamadan sonra tasarımın uygun olup olmadığı kontrol edilerek ÇBGA optimizasyon sürecinin yeniden başlatılıp başlatılmayacağına karar verilir.

3.2. Dalgıç Asenkron Motorun Sonlu Elemanlar

Analizi (Finite Element Analysis of Submersible Induction Motor)

Motor performansını etkileyen parametreler ve kullanılan malzemelerin lineer olmayan yapısı gibi nedenlerden dolayı elektrik makinelerinin tasarım optimizasyonu tabiatıyla zordur. Optimizasyonda analitik olarak hesaplanan motor kayıpları tam doğruyu yansıtmayabilir. Ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz neticesinde motor kayıpları hakkında daha doğru veriler elde edilebilir. Sonlu elemanlar analizi; stator sargılarının dağılımı, magnetik doyum ve akım dağılımları hakkında eş zamanlı olarak inceleme imkânı sunar [20,21].

İki boyutlu magnetik alan dağılımını belirlemek için genel bir eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + j\omega\sigma A \quad (21)$$

Burada A ; magnetik potansiyel vektörü, σ ; iletkenlik, ω ; açısal hız, J_s ; akım yoğunluğu ve v dirençtir (reluctivity). Açısal hızı 'kayma'ya bağlı olarak ifade edip ($s\omega_s$) Denklem (21) aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + js\omega_s\sigma A \quad (22)$$

Rotor akımları kaymaya bağlı olarak değişirken, stator akımlarının frekansı ile kaynak akımlarının frekansı aynı olduğu Denklem (22) den anlaşılmaktadır. Ayrıca kaynak gerilimi, kaynak frekansı ve sargı empedansları kaymaya bağlı olarak ölçeklendirilir. Böylece stator

parametreleri rotor kısmına aktararak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi, dalgıç asenkron motora, ANSYS ticari yazılım paketi kullanılarak uygulandı. Stator sargı sonu ve bileziklerin empedansları analitik olarak hesaplanarak modele dâhil edildi. Akı yoğunluğu bütün stator boyunca hesaplandı. Birinci dereceden üçgen elementler kullanıldığından her bir elementteki akı yoğunluğu sabittir. Stator demir kayıpları bütün elementlerdeki kayıplar toplanarak bulundu. Her bir elementteki akı yoğunluğuna bağlı olarak meydana gelen güç kayıpları, üretici verileri temel alınarak hesaplandı. Rotordaki demir kayıpları rotor frekansı ve hızı değiştiğinden sabit değildir. Bu yüzden rotorda meydana gelen demir kayıpları frekansla orantılı olarak değiştiği varsayılarak statorda olduğu gibi hesap edildi.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (THE RESULTS AND DISCUSSION)

Dalgıç asenkron motorun çok kriterli bulanık genetik algoritma optimizasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların tatmin edici olduğu görülmüştür. Optimizasyon sürecinde kullanılan parametrelerde literatürde önerilen değerler seçilmiş [5,6] ve yapılan incelemelerde popülasyon sayısı 100 ila 200, çaprazlama oranı 0,5 ila 0,9 ve mutasyon oranı 0,01 ila 0,05 arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu bilgiler ışığında, optimum çözüm elde etmek için aşağıda verilen genetik algoritma parametreleri kullanılmıştır.

Popülasyon sayısı	: 150
Çaprazlama tipi	: Tek noktalı
Çaprazlama oranı	: 0,7
Mutasyon tipi	: "bit" mutasyon
Mutasyon oranı	: 0,01
İterasyon sayısı	: 1000

Gerçekleştirilen simülasyonların sonunda uygunluk fonksiyonu en yüksek üyelik derecesi olan, $\mu_D = 0.9369$ 'da en iyi çözüm elde edilmiştir. Mevcut motor ve ÇBGA optimizasyon sonuçları Tablo 3 ve

Tablo 3. Tasarım parametreleri optimizasyon sonuçları (The design parameter optimization results)

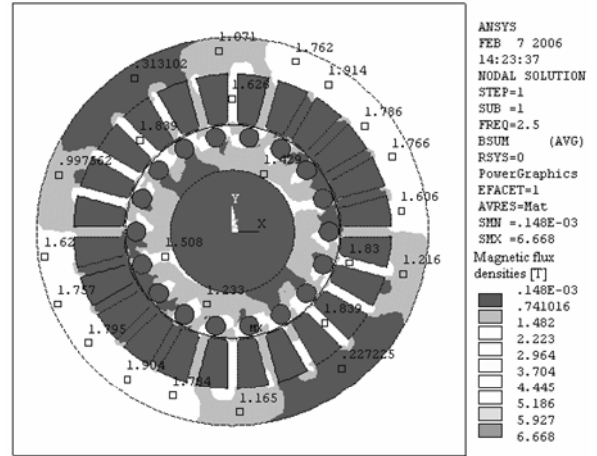
	Mevcut motor	ÇBGA
Bir faz sarım sayısı	36 (paralel)	36
Stator demir uzunluğu(cm)	77	70.251
Bilezik genişliği (mm)	28	18.500
Stator iç çapı (cm)	8.925	9.645
Stator oyuk yüksekliği (mm)	21.5	16.137
Stator oyuk genişliği (mm)	13	13.138
Hava aralığı (cm)	0.075	0.0747
Kapalı rotor oyuğunun hava aralığına olan mesafesi (cm)	0.05	0.0639
Rotor çubuk çapı (mm)	8	8.823
Stator dış çapı (cm)	18	18

Tablo 4. Tasarımların karşılaştırılması (Comparisons of the different designs)

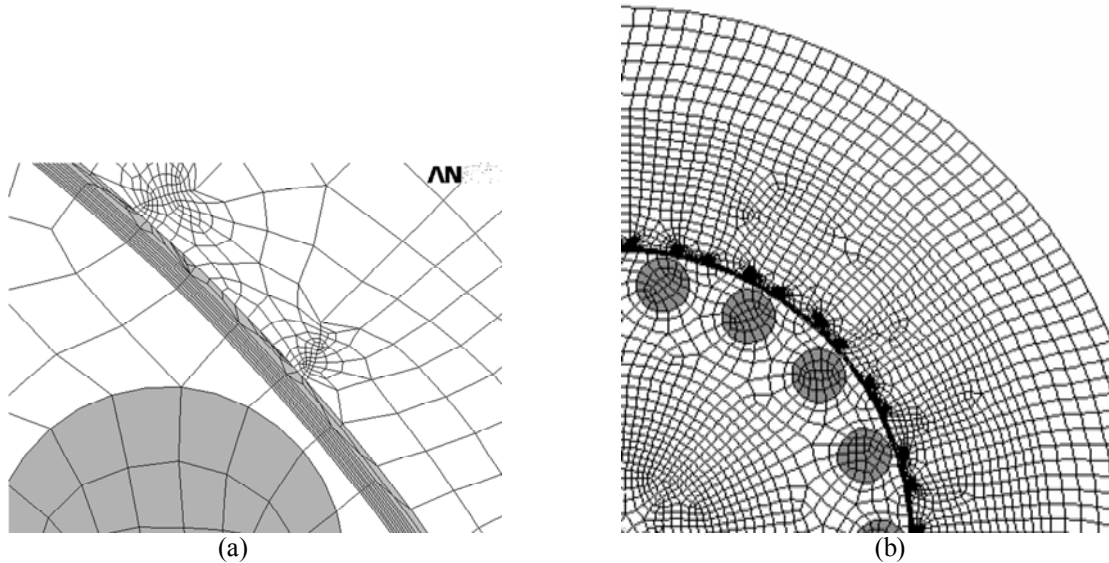
	Mevcut motor	ÇBGA	SEY
Maliyet (\$)	807.72	756.00	-
Tam yük momenti (Nm)	171.38	187.14	186.35
Devrilme momenti (Nm)	344.44	373.96	372.32
Kalkış momenti (Nm)	132.22	153.29	151.13
Güç Faktörü	0.837	0.855	0.861
Verim (%)	85.59	86.96	88.26
Nominal akım (A)	106.37	109.37	109.43
Kalkış akımı (A)	422.28	450.80	447.36
Stator dış akı yoğunluğu (T)	1.593	1.995	1.839
Rotor dış akı yoğunluğu (T)	1.439	1.381	1.612
Stator boyunduruk akı yoğunluğu (T)	1.519	1.544	1.801
Rotor boyunduruk akı yoğunluğu (T)	2.13	1.540	1.508
Rotor akım yoğunluğu (A/mm ²)	13.08	11.969	11.99
Sıcaklık (°C)	65	65	65
Kayma	0,05	0,05	0,05
Stator sargı dolgu faktörü	0.1898	0.182	0.19

4’de verildi. Tablolardaki sonuçlardan görüldüğü gibi, motor maliyeti %7 oranında azalırken motorun kalkınma momenti ve tam yük momenti sırasıyla %15 ve %9 oranında artmaktadır. Mevcut motor dikkate alındığında elde edilen bu sonuçların kayda değer olduğu görülmektedir.

Dalgıç asenkron motorun ANSYS de gerçekleştirilen kısmi bir modeli Şekil 2’de gösterilmiştir. Motor yüklü durumda iken magnetik akı yoğunluğu dağılımı ise Şekil 3’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi magnetik akı dağılımı düzgün ve homojendir. Sonlu elemanlar analizi sayısal sonuçları aynı zamanda Tablo 4’de verilmiştir. Burada ÇBGA ve SEY den elde edilen magnetik akı yoğunlukları birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Daha önceden belirtildiği gibi ÇBGA hesaplamaları eşdeğer devre esas alınarak yapıldığından tam güvenli sonuç vermeyebilmektedir.



Şekil 3. Tam yükteki magnetik akı yoğunlukları (Distribution of magnetic flux densities in full load)



Şekil 2. Dalgıç asenkron motorun ANSYS modelinden bir kesit a) Hava aralığı b) Yarım kutup (Cross sections of meshed submersible motor a) Mesh in air gap b) Mesh in a half pole pitch)

Bu nedenle magnetik akı hesaplamalarında, SEY analizinden elde edilen sonuçların daha geçerli olduğu düşünülmektedir. Genel olarak Şekil 3'deki magnetik akı yoğunlukları kabul edilebilir bir seviyede olup herhangi bir magnetik doyum söz konusu değildir. ÇBGA optimizasyonu ve SEY analizinden elde edilen sonuçlar uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Motor performans karakteristikleri Şekil 4'de verilmiştir. Grafiklerde görüleceği gibi motorun farklı hız değerlerinin her biri için SEY analizi yapılmış ve moment, akım, güç faktörü ve verim değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalardan ÇBGA ve SEY sonuçları birbirine oldukça yakın değerler aldığı şekilden anlaşılmaktadır. Böylece mevcut motora göre optimize edilmiş motor arasındaki performans ilerlemeleri açıkça görülmektedir.

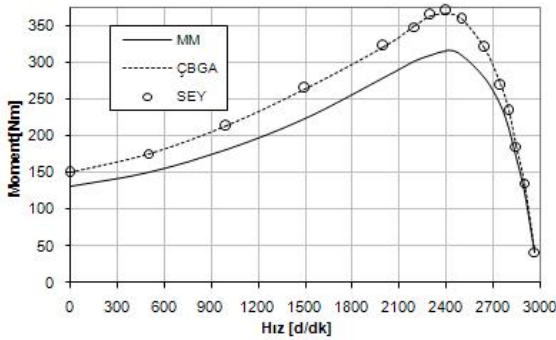
5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede çok kriterli bulanık genetik algoritma optimizasyonu sunuldu ve başarılı bir şekilde dalgıç asenkron motorun tasarım optimizasyonuna uygulandı. Elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla motorun sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildi. Çok kriterli bulanık genetik algoritma optimizasyonu ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görüldü. Dalgıç asenkron motor maliyeti %7 oranında azalırken, tam yük momentinin %9 oranında arttığı görüldü. Bu sonuçlar

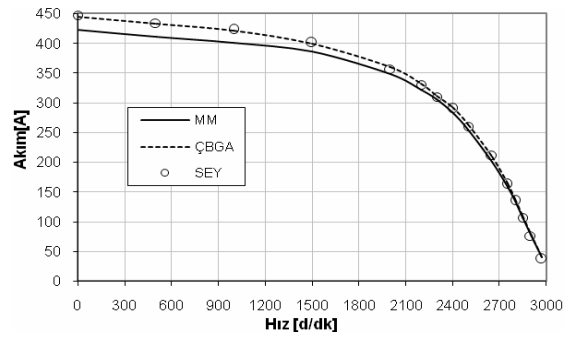
motor performansında iyileştirmelerin olduğunu göstermektedir. Böylece amaçlanan yöntemin elektrik motorlarının tasarım optimizasyonunda etkili olduğu görüldü.

SİMGELER (SYMBOLS)

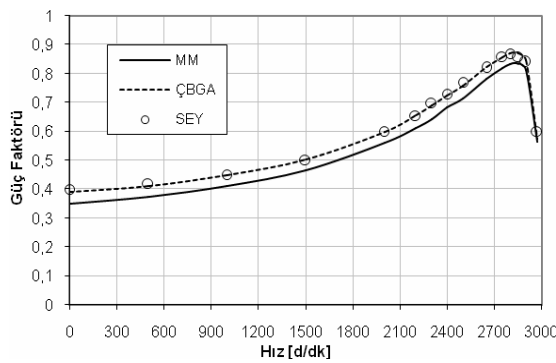
A_{1m}, A_b	Stator ve rotor iletkenlerinin sırasıyla kesit alanı
A_r, A_g	Bilezik ve hava aralığının sırasıyla kesit alanları
Cu_{cost}	Bakır birim maliyeti
Fe_{cost}	Demir birim maliyeti
f_{ew}	Sargı sonu faktörü
g	Hava aralığı
L_1, L_2	Stator ve rotorun sırasıyla eksenel uzunluğu
P_{fe}	Demirin birim yoğunluğu
P_{sw}, P_{rw}	Stator ve rotor iletkenlerinin sırasıyla birim yoğunluğu
r_{ew}	Ortalama sargı sonu uzunluğu
SF	Dolgu faktörü
S_1, S_2	Stator ve rotor oyuklarının sırasıyla sayısı
w_a, w_r	Rotor bileziklerinin sırasıyla eksenel ve radyal uzunluğu



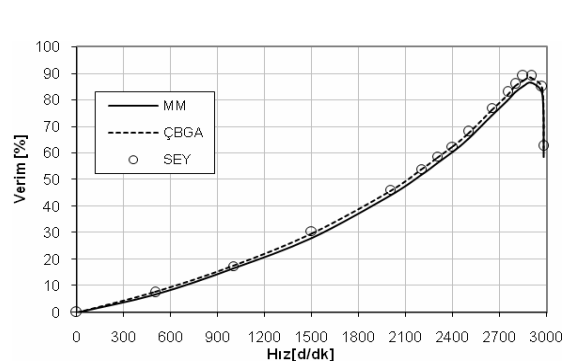
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. Performans karakteristikleri a) Moment-Hız, b) Akım -Hız c) Güç faktörü-Hız ve d) Verim-Hız eğrileri. (MM: Mevcut Motor, ÇBGA: Çok kriterli bulanık genetik optimizasyonu, SEY: Sonlu elemanlar yöntemi) (Performance Characteristics; a) Torque-speed, b) Current-speed, c) Power factor-speed and d) Efficiency-speed curves)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boldea I., Nasar, S.A., **The Induction Machine Handbook**, CRC Press, 2002.
2. Appelbaum J., Fuchs E.F., White J.C., “Optimization of three-phase induction motor design, Part I, Part II: formulation of the optimization technique”, **IEEE Trans. on Energy Conv**, Vol. 2, pp. 407–422, 1987.
3. Fci R., Fuchs E.F., Huaugh H., “Comparison of two optimization techniques for the design of a three-phase induction motor design”, **IEEE Trans on Energy Conv**, 4(4):651-9,1989.
4. Faiz J., Sharifian M.B.B., “Optimal design of an induction motor for electric vehicle”, **European Trans. on Electrical Power**, Vol. 16, pp. 15-33, 2006.
5. Bianchi N., Bolognani S., Design optimization of electric motors by genetic algorithm”, **IEE Proc. Electr. Power Appl.**, Vol.145, pp. 475-483, 1998.
6. Wiczeorek J.P., Göl Ö., Michalewicz Z., “An evolutionary algorithm for the optimal design of induction motors”, **IEEE Trans. On Magnetics**, Vol. 34, pp. 3882-3887, 1998.
7. Çunkaş M., Akkaya R., Bilgin O., “Cost optimization of submersible motors using a genetic algorithm and a finite element method”, **Int. J of Adv. Manuf. Technol.**, vol.33, pp. 223-232, 2007.
8. Im C.H., Jung H.K., Kim Y.J., “Hybrid genetic algorithm for electromagnetic topology optimization”, **IEEE Trans. On Magnetics**, Vol. 39, pp.2163-2169, 2003.
9. Pillay P., Nolan R., Haquue T., “Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations”, **IEEE Trans. On Ind. Appl.**, Vol. 33, pp. 1273-1282, 1997.
10. Kim M.K., Lee C.G., Jung H.K., Multiobjective optimal design of three-phase Induction motor using improved evolution strategy, **IEEE Trans On Magnetics**, Vol. 34, pp 2980-2983, 1998.
11. Mirzaeian B., Moallem M., Tahani V., Lucas C., “Multiobjective optimization method based on a genetic algorithm for switched reluctance motor design”, **IEEE Trans. on Magnetics**, Vol. 38, pp. 1524-1527, 2002.
12. Liuzzi G., Lucidi S., Parasiliti F., Villani M., « Multiobjective optimization techniques for the design of induction motors”, **IEEE Trans. on Magnetics**, Vol. 39, pp. 1261-1264, 2003.
13. Bellman R.E., Zadeh L.A., Decision making in a fuzzy environment, **Management science**, Vol.17, pp. 141-164,1970.
14. Trebi-Ollennu A., White B.A., “Multiobjective fuzzy genetic algorithm optimization approach to nonlinear control system design”, **IEE Proc.-Control Theory Appl.**, Vol.144, pp. 137-142, 1997.
15. Huang H.Z., Gu Y.K., Du X., “An interactive fuzzy multi-objective optimization method for engineering design”, **Eng. Appl. of Artificial Intelligence**, Vol. 19, pp. 451-460, 2006.
16. Chen L., “Multiobjective design optimization based on satisfaction metrics”, **Engineering Optimization**, Vol.33, pp. 601-617, 2001.
17. Minghua Y., Changwen X., “Multiobjective fuzzy optimization of structures based on generalized fuzzy decision-making”, **Computers & Structures**, pp. 411-417, 1994.
18. Faiz J., Sharifian M.B.B., Keyhani A., Proca A., “Performance comparison of optimally designed induction motors with aluminum and copper squirrel-cages”, **Elect. Machinery and Power Systems**, Vol. 28, pp. 1195-1207, 2000.
19. Veinott C.G., **Theory and design of small induction motors**, McGraw-Hill, New York, 1959.
20. De Weerd H.R., Tuinman E., “Finite element analysis of steady state behavior of squirrel cage induction motors compared with measurements”, **IEEE Trans. on Magnetics**, Vol. 33, pp. 2093-2096, 1997.
21. Bianchi N., Bolognani S., Comelato G., “Finite element analysis of three phase induction motors: comparison of two different approaches”, **IEEE Trans. on Energy Conv**, Vol. 14, pp. 1523-1528, 1999.