

ELEKTROMANYETİK TASARIM PROGRAMI KULLANILARAK ELEKTRİK MAKİNELERİNİN TASARIMINDA BOYUT OPTİMİZASYONU İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ İKİNCİ DERECEDEN HASSASİYET ANALİZİ TEMELLİ NÜMERİK BİR YAKLAŞIM

İsmail TOPALOĞLU ve Osman GÜRDAL*

Çankırı Meslek Yüksekokulu, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Taşmescit Mevki, Çankırı, 18100

*Elektrik Eğitim Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 06500

itopaloglu@karatekin.edu.tr, ogurdal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 11.05.2009 ; Kabul/Accepted: 12.01.2010)

ÖZET

Bu çalışmada elektrik makinelerinin tasarımında boyut optimizasyonu için geliştirilen ikinci dereceden hassasiyet analizi temelli nümerik bir yaklaşımın formülasyonu ve çözüm algoritması sunulmuştur. Çalışmada elektrik makinelerinin tasarımında boyut optimizasyonu için kullanılan ikinci dereceden hassasiyet analizi temelli nümerik yaklaşım; elektromanyetik tasarım programı kullanılarak optimizasyon problemi çözüm limitlerinin karma değerlerden oluştuğu yeni bir yaklaşım ile hazırlanan script sayesinde gerçekleştirilmiştir. Bu yeni nümerik metod temelinde, tasarımcılar elektrik makinelerinin tasarımında pratik çözümlere standart bir elektromanyetik tasarım programı kullanarak ulaşabileceklerdir. Önerilen metodun uygulanabilirliği çıkık kutuplu senkron hidrogeneratör optimizasyon probleminde Ansoft Rmxprt kullanılarak gösterilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki hassasiyet analizi içeren bu metod da çözümlerde ilk tasarıma göre yaklaşık %15 iyileştirme sağlanmıştır, aynı zamanda diğer metotlara göre önemli avantajları vardır ve diğer elektromanyetik aygıtların boyut optimizasyonu için de kullanılabilir.

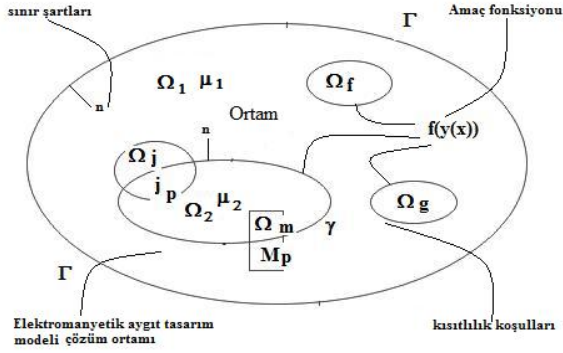
Anahtar Kelimeler: Tasarım optimizasyonu, hassasiyet analizi, elektromanyetik tasarım, hidrogeneratör, boyut optimizasyonu.

A SECOND ORDER SENSITIVITY ANALYSIS BASED NUMERICAL APPROACH DEVELOPED FOR DIMENSION OPTIMIZATION, IN ELECTRIC MACHINE DESIGN BY ELECTROMAGNETIC DESIGN SOFTWARE

ABSTRACT

This paper presents the formulation of developed second order sensitivity analysis when applied to shape optimization in design of electrical machine problems. It used the second order sensitivity analysis based on numerical approach that is variable have mixed solution limits to the shape optimization problems which using with standard electromagnetic design analysis (EDA) software. Based on this numerical methodology; designers will be able to deal with practical design optimization of electrical machines using with standard EDA software. The applicability of the proposed methodology is demonstrated by optimizing the salient pole synchronous hydro generator. The results show that the sensitivity analysis technique is provided improvement of solution about %15 and would appear to have certain important advantages over the other methods.

Keywords: Design optimization, sensitivity analysis (SA), electromagnetic design (EDA) analysis, hydrogenerator, shape optimization.



Şekil 2. Amaç fonksiyonu çözümü için elektromanyetik sınır gösterimi (Electromagnetic boundary conditions for objective function solution)

akım yoğunluğunun (J) kaynağı mıknatis (Ω_m) veya akım olabilir (Ω_j). Aygıtta kullanılan malzemelerin manyetik geçirgenlikleri (μ_r) çözümde dikkate alınmaktadır.

FUJII, N. [3] aşağıda tanımlanan optimizasyon problemine çözüm aramak için; iki boyutlu öklid uzayında R^2 bir düzlem seçmiş. Oluşturulan çözüm domeni $\Omega \in R^2$ için amaç fonksiyonunun istenilen maksimum veya minimum değerini içermesi gerektiği vurgulanarak, amaç fonksiyonu $J(\Omega, u)$ denklem 6'daki gibi tanımlanmıştır.

$$J(\Omega, u) = \int_{\Gamma} f(x, u(x)) dx, \quad (6)$$

Bu çalışmada kullanıldığı şekliyle;

$$J(\Omega, u) = \int_{\Gamma} f \left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}}, u(x_k) \right) dx_k, \quad (7)$$

Burada, Γ , Ω için çözüm sınırı ($\Gamma \equiv \partial\Omega$) ve $u(x_k)$ de sınır değer problemi için çözümü ifade etmektedir;

$$\begin{aligned} \Delta u(x_k) - Kx_k \cdot u(x_k) &= g(x_k) & (x_k \in \Omega), \\ u(x_k) &= K(\text{const.}) & (x_k \in \Gamma). \end{aligned} \quad (8)$$

Bura da, verilen fonksiyon $K(x_k) \geq 0$, $g(x_k)$ ve $f \left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}}, u(x_k) \right)$ birbirlerinin (x_k) argümanları için sürekli yeter olduğunu varsayarsak. Aynı zamanda Ω domeninin sürekli çözümü barındırdığı sağlanmalı.

$$I(\Omega) \equiv \int_{\Omega} h \left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}} \right) dx_k = c(\text{const}), \quad (9)$$

Bu değişken çözüm sınırları içinde sabit olarak genelleştirilmiştir.

Yao, Y. [4] ve diğerleri nonlinear elektromanyetik ve girdap akım problemleri için nümerik bir yöntem sunmuşlardır.

$$\left([K] + \frac{\partial v}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial A} [K][\bar{A}] \right) \delta A^k = [f] - [K][\bar{A}] \quad (10)$$

Sunulan yöntemde kullanıldığı şekliyle denklem 10'da ifade edilir.

Bir elektrik makinesinin sargılarına akım uygulandığı zaman akım yoğunluğu oluşmaktadır ve enerji, kuvvet ve indüktans manyetik vektör potansiyeli (A) ile çözüm domeni içindeki sınırlarda bağlantılıdır. Şimdi çözüm domeni içinde manyetik vektör potansiyelini bir değişken olarak amaç fonksiyonu için istenilen minimum ya da maksimum değerini içerecek şekilde tanımlayabiliriz $J(\Omega, u)$ [5].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r \mu_0} (\nabla \times \bar{A} - \bar{B}_r) = \bar{J} \quad (11)$$

Denklem 10'daki gibi bu çalışmada lineer sistem eşitlikleri üretmek için Galerkin'in yaklaşımı manyetik vektör potansiyeline uygulanırsa [6];

$$[R] = \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right] [\bar{A}] - [Q] \quad (12)$$

ifadesi elde edilir.

Tasarım hassasiyet'i amaç fonksiyonunun tasarım değişkenleriyle beraber toplam türevi olarak denklem 13'te tanımlanmıştır.

$$\frac{d}{d \left[\left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}} \right) \right]} \bar{f} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial \left[\left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}} \right) \right]} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial [\bar{A}]} \frac{d[\bar{A}]}{d \left[\left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}} \right) \right]} \quad (13)$$

Denklem 12'nin her iki tarafının diferansiyeli alınarak ve ek değişken $[\chi]^T$ ile çarpılarak, denklem 14 ve 15 elde edilir.

$$[\chi]^T ([K] + [\bar{K}]) \frac{d[A]}{d \left[\left(x_k^{x_k^{u_2}} \geq x_k \geq x_k^{x_k^{l_2}} \right) \right]^T} \quad (14)$$

ve

$$= -[\chi]^T \left(\frac{\frac{\partial [R]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \right) \frac{\frac{\partial [R]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \frac{\partial B^2}{\partial [A]^T} \cdot [\bar{A}] \quad (15)$$

ifadeleri elde edilir.

Matrisler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$[\bar{K}]^T = \frac{\frac{\partial \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right]}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial [A]^T} \cdot [\bar{A}] \quad (16)$$

$$\left(\frac{\frac{\partial [R]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \right) \frac{\frac{\partial \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right]}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \cdot [\bar{A}] \quad (17)$$

$$\frac{\frac{\partial [R]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\mu_r \mu_0} = \frac{\frac{\partial [K]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\mu_r \mu_0} \cdot [\bar{A}] \quad (18)$$

Eğer $[\chi]$ katsayı olarak alırsak

$$d[A] / \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]$$

için denklem 13 ve 15 birbirine eşit olmaktadır.

Ek değişken aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$[K + \bar{K}]^T [\chi] = \frac{\partial f}{\partial [A]} \quad (19)$$

Sonuç olarak tasarım hassasiyet denklemi:

$$\frac{\frac{\partial f}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \frac{\frac{\partial [R]}{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}}{\frac{\partial \left[\left(x_{k1}^{u1} \geq x_k \geq x_{k1}^{l1} \right)^T \right]}{\mu_r \mu_0}} \frac{\partial B^2}{\partial [A]^T} \cdot [\bar{A}] \quad (20)$$

ile ifade edilir [15].

3. OPTİMİZASYON ÇÖZÜM ALGORİTMASI (FLOWCHART OF OPTIMIZATION SOLUTIONS)

Optimizasyon için hassasiyet analizini içeren ve klasik geniş aralıkta çözüm arayan ve çözüm için çok fazla iterasyon yapılması gereken optimizasyon yerine daha kuvvetli ve hassas yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan her iterasyonda sonucun çözüm limitleri sorgulanarak aralığın olabildiğince küçülmesi sağlanmaya çalışılmış ve amaç fonksiyonunun minimize ya da maksimize edecek optimum değeri içeren aralık daraltılmıştır. Elde edilen çözüm aralığı ile denklem 20'de kullanılan malzemenin manyetik geçirgenliği de dikkate alınarak Şekil 2'de verilen elektromanyetik sınır koşulları içinde çözüm aranmıştır.

Şekil 3'de çözüm akış şeması yer almaktadır [15]. Geliştirilen algorithmda Maxwell Rmxprt ardışık karma değişken nonlinear programlama metodu ve hassasiyet analizi temel alınmış [16], çözüm sürecine değişkenler için yeni limit belirleyici bir akış oluşturulmuş ve değişkenlerin limitleri kendi içlerinde alt ve üst limitlere ayrılmıştır.

4. UYGULAMA (APPLICATION)

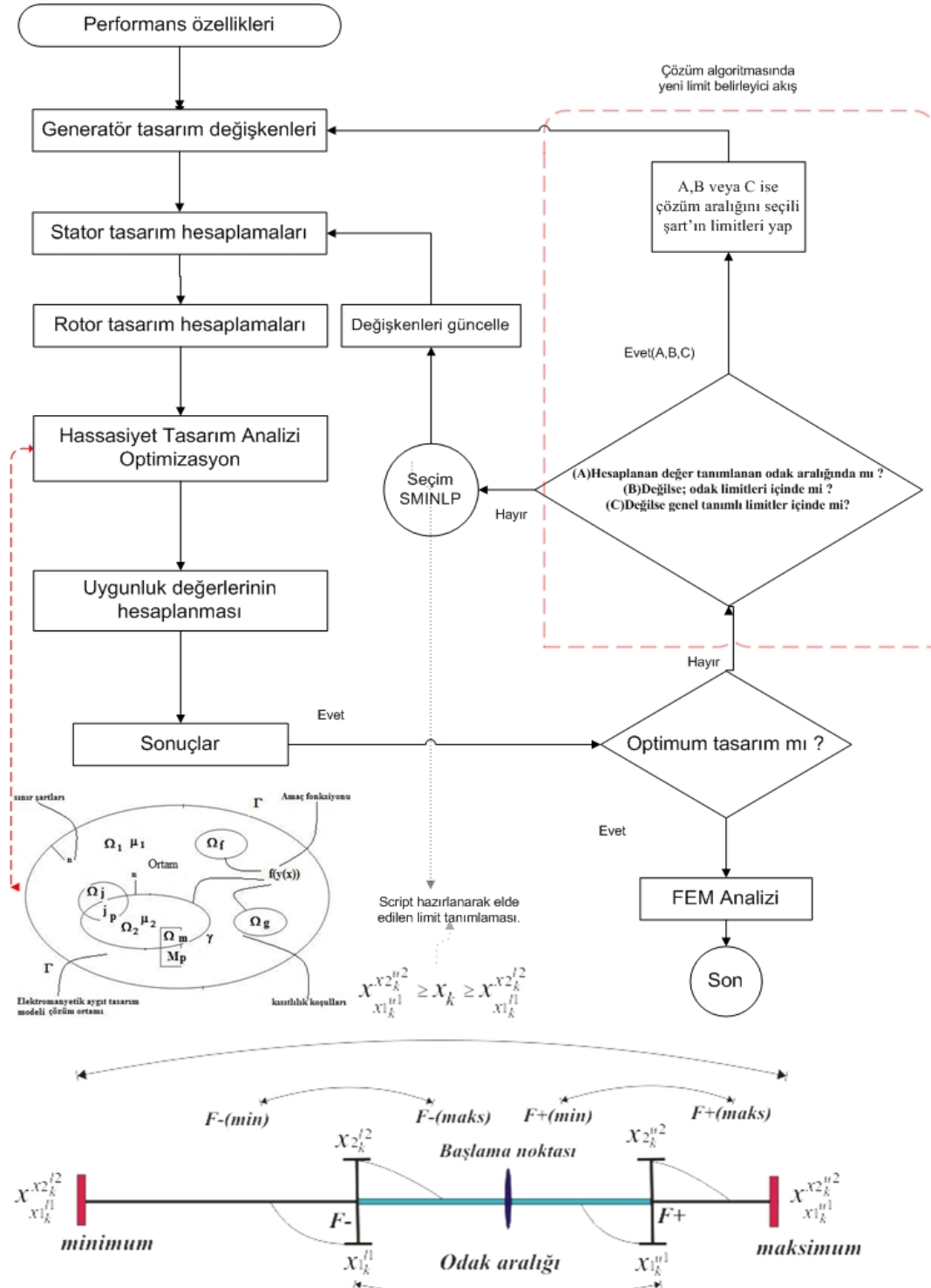
Önerilen çalışma 550 kVA çıkık kutuplu senkron hidrogeneratöre başarılı bir şekilde boyut optimizasyonu ve hassasiyet analizi için uygulanmıştır [15]. Hidrogeneratör statoru 72 oyuk, dengeli 6 kutup, üç faz ve yıldız bağlı stator sargılarından oluşmaktadır. Simetri ve yüksüz çalışma şartlarında optimizasyon ve analiz için Ansoft Rmxprt programı senkron generator nonlinear hassasiyet çözücü modülü kullanılmıştır.

Şekil 4'te tanımlanan değişkenler verimi maksimum yapmak için optimize edilmiştir. Verim amaç fonksiyonu kısıtlılık şartı; $\eta \geq \% 90$ ile ifade edilmiştir. Aşağıda değişkenlerin tanımlamaları, limitleri ve sayısal değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere geliştirilen metod sayesinde tasarımcının deneyim eksikliği çok geniş sınırlar seçmesi yerine çözüm sınırları içinde odak noktaları ve bu noktalar içinde alt ve üst sınır değeri girilmesi ile beraber problemin başlangıç noktası gerçek çözüme çok yakın olarak tahmin edilebilmektedir. Optimizasyon sonucunda verim (η) %95,5 olarak gerçekleşmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrik makinelerinin tasarımında boyut optimizasyonu için elektromanyetik tasarım programı (Ansoft Rmxprt) kullanılarak ikinci dereceden hassasiyet analiz temelinde nümerik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşıma ait matematiksel formülasyon ve çözüm algoritması sunulmuş ve önerilen metodun uygulaması çıkık kutuplu senkron hidrogeneratör boyut optimizasyonu uygulaması ile gösterilmiştir.



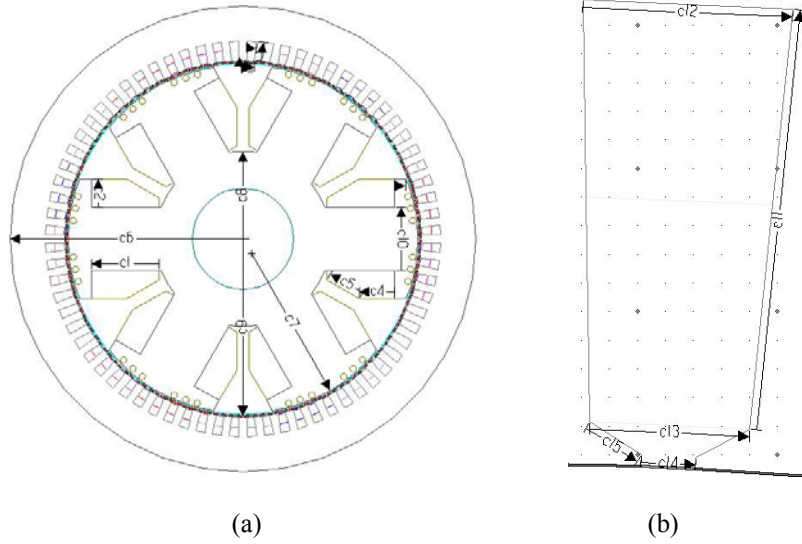
Şekil 3. Boyut optimizasyonu için geliştirilen optimizasyon çözüm algoritması. (Flowchart of improved algorithm to shape optimization)

Elektromanyetik aygıtların boyut optimizasyon problemine geliştirilmiş nümerik yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Çözümün hassasiyet analizinde içermesi tasarlanan aygıta ait üretim toleranslarının belirlenmesinde büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Önerilen metod birçok ön tasarımda denenmiş ve sonuçların ilk tasarım değerlerine göre ortalama %15 oranında iyileştirildiği görülmüştür. Optimizasyon işlemi son-

rasında elde edilen %95,5 verim değeri verim amaç fonksiyonu değerini %5,5 kadar geçmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dong-Hun Kim, K. S. Ship, and J. K. Sykulski, "Applying Continuum Design Sensitivity Analysis Combined With Standard EM Software to Shape Optimization in Magnetostatic Problems" **IEEE**



Şekil 4. Optimizasyon probleminde kullanılan hidrojenatör değişkenleri. (a) Genel değişkenler, (b) Stator oyuk değişkenleri. (Variables of hydrogenerator used in optimization problem. (a) General variables, (b) Stator slot variables)

Tablo 1. Tasarım değişkenleri limit değerleri ve sonuçlar. (Design variables and their limit values and result)

Tasarım Parametreleri $\eta \geq \% 90$ için;		Başlangıç Noktası	Alt Sınır	Üst Sınır	Odak Noktası Alt Sınır	Odak Noktası Üst Sınır	Odak Noktası Alt Sınır-2	Odak Noktası Üst Sınır-2	Gürültü	Sonuçlar	
c1	Stator iç çapı (mm)	D_i	550,8632	450	600	500	580	530	565	0,1	558,80
c2	Stator oyuk yükseklği (mm)	H_2	28,26832	20	45	25	33	26,5	32,2	0,1	29,4
c3	Stator alt oyuk genişliği (mm)	B_1	10,86458	8,5	13,5	10	12	10,4	11,8	0,001	11,4
c4	Kutup gövde yükseklği(mm)	P_1	105,68	90	130	98	120	101	117	0,01	110
c5	Kutup gövde genişliği(mm)	P_2	86,5	80	110	90	105	94	100	0,01	99,1
c6	Kutup ayak yükseklği(mm)	P_h1	31,82	30	45	33	40	36	39	0,01	36,6
c7	Kutup ayak genişliği (mm)	P_h2	186	175	225	185	195	187	192	0,001	189,5
c8	Minumum hava aralığı (mm)	g_{min}	2,6826	2	5,5	2,5	4,2	2,8	4,12	0,01	3,55
c9	Stator dış çapı (mm)	D_0	718,65	710	850	720	755	724	742	0,1	736,60
c10	Stator oyuk ağız genişliği (mm)	B_{s0}	2,98646	2	6	3	5	3,2	4,8	0,01	3,9
c11	Stator üst oyuk genişliği (mm)	B_2	11,8614	10	20	12	18	14	16,8	0,01	15
c12	Kutup yay merkezi uzaklığı (mm)	p_{arc}	24,22648	22,5	29	24	27	24,4	26,8	0,001	25,85
c13	Rotor boyunduruk genişliği (mm)	h_{yr}	189,23	185	215	190	205	192	200	0,001	195,75
c14	Yığın uzunluğu(mm)	l_i	385,4	380	425	380	405	384	401	0,01	395
c15	Stator dış genişliği (mm)	B_{th}	10,7832	10	15	11	14	12	13,8	0,001	13,238

Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp. 1156—1159 March 2004

- Jae Seop Ryu, Yingying Yao, Chang Seop Koh, “Optimal Shape Design of 3-D Nonlinear Electromagnetic Devices Using Parameterized Design Sensitivity Analysis”, **IEEE**

Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, Pp. 1792-1795 May 2005.

- Fujii, N. “Second Order Sensitivity Analysis for a Class of Shape Optimization Problems”, 0-7803-1328-3, **IEEE Transactions on Magnetics**, pp. 1176-1178, 1994.

4. Yingying Yao, Jae Seop Ryu*, "3D Shape Optimization of Electromagnetic Devices by Using Design Sensitivity Analysis" **IEEE Transactions On Magnetics**, pp.786-789.
5. J. K. Sykulski and M. Santilli, "A procedure for magnetic design and optimization of permanent brushless DC motors," **COMPEL**, vol. 17, no. 5/6, pp. 749–756, 1998.
6. Parent, G.; Dular, P.; Ducreux, J.-P.; Piriou, F. "Using a Galerkin Projection Method for Coupled Problems" **IEEE Transactions on Magnetics**, Volume 44, Issue 6, 830 – 833, June 2008.
7. R. Rong and D. A. Lowther. "Applying response surface methodology in the design and optimization of electromagnetic devices," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 33, pp. 1916–1919, Mar. 1997.
8. T. N. Nguyen and J. L. Coulomb, "High order FE derivatives versus geometric parameters. Implantation on an existing code," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 35, pp. 1502–1505, May 1999.
9. I.-H. Park, J. L. Coulomb, and S.-Y. Hahn, "Implementation of continuum sensitivity analysis with existing finite element code," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 29, pp. 1787–1790, Mar. 1993.
10. N. Fujii, "Second variation and its application in a domain optimization problem", in **Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Control of Distributed Parameter Systems**, pp. 431-436, 1986.
11. N. Fujii, "Second-order necessary conditions in a domain optimization problem", **Journal of Optimization Theory and Applications**, vol. 65, pp. 223-244, 1990.
12. N. Fujii, "Domain optimization problems with a boundary value problem as a constraint", in **Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Control of Distributed Parameter Systems**, Los angeles, pp. 49. 1986.
13. C. Chat-uthai, J.A Ramirez, E.M. Freeman, D.A. Lowther, "Non- linear constrained optimisation techniques for magnetostatic problems," **Proc. Of the 6th ISI3.4**, Seoul, Korea, 22-24 June, 1994.
14. K. Weeber and S. R. H. Hoole, "Geometric parameterization and constrained optimization techniques in the design of salient pole synchronous machines," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 28, no. 4, pp. 1948–1960, Jul. 1992.
15. Topaloğlu, İ. "**Hidroelektrik Generatör Tasarımında Optimizasyon Teknikleri**", Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
16. Ansoft Corporation Maxwell 3D&2D, Optimetrics® ve RMXprt help files, "Setting Up An Optimization Problem", "Getting Started with Maxwell and RMXprt" **Ansoft Corporation**, U.K. 2006.