

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNA TASARIMINDA TAGUCHI YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

Ünal KURT¹

Güven ÖNBİLGİN²

¹Amasya Üniversitesi, M.Y.O. Elektrik Programı, 05184, AMASYA

²Elektrik/Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Ondokuzmayıs Üniversitesi 55159 Kurupelit/ SAMSUN

¹e-posta: ukurt@omu.edu.tr, ²e-posta: gonbilgi@omu.edu.tr

Anahtar Sözcükler: Eksenel Akı, Deneysel Tasarım, Elektrik Makinaları

ABSTRACT

In this paper a design methodology is introduced for Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines. Axial Flux Machines are very popular in renewable energy systems because of their lightweight and compact designs. Introduced algorithm is Design of Experiment with Taguchi approach. By using orthogonal experimental design and analysis techniques, these methods allow an industrial process to be optimized with only a small number of experiments.

1. GİRİŞ

Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Makinalar(EASMSM) yenilenebilir enerji kaynakları gereksiniminin arttığı günümüzde tıkHz yapıları ve yüksek güç yoğunluklarıyla ön plana çıkmaktadırlar. Gerekli akı uyarımı için sürekli miknatıslar kullanılmasından dolayı hava aralığı akısının yeteri kadar ve en etkin biçimde elde edilmesi önemli olmaktadır. Etkin bir makina elde etmek için uygun tasarım modelini geliştirmek üzere deneysel tasarımın (Design of Experiment) özel bir uygulaması olan Taguchi yaklaşımı kullanıldı. Alan hesaplamaları ise son yıllarda en geçerli yöntemlerden birisi olan Sonlu Elemanlar Yöntemiyle sayısal olarak yapıldı.

Bu makalede iki ayrı tasarım optimizasyonu gerçekleştirildi. Birincisinde makinanın üç dereceli dört adet faktörü seçildi. Bunlar hava aralığı magnetik akısını en yüksek oluşturacak şekilde optimize edildiler. Sonlu Elemanlar ile hava aralığı magnetik akısı hesaplanıp sonuçlar ANOVA çözümlenmeleri ile irdelendikten sonra optimum faktör dereceleri seçildi. Tasarıma başlamadan önceki referans ve optimize edilmiş modelin akı eğrileri sırasıyla Şekil 6 ve 7'de verilip karşılaştırıldı.

İkincisinde ise sürekli hal eşitlikleri kullanılarak iki dereceli yedi ayrı faktör L-8(2⁷) Tahuchi tablosunda çözümlenerek faktörleri içeren yeni bir tasarım eşitliği olarak Regresyon denklemi elde edildi.

2. TAGUCHI YÖNTEMİ

Deneysel tasarım ürüne etki eden faktörlerin en uygun derecelerini bulmak için denemeler yapmayı öneren bir yöntemdir. Tüm faktörlerin olası etkilerinin hepsini aynı anda görmek çok büyük sayılarda deneme gerektirmektedir. Bu hem uzun hesaplama süreleri hem de büyük maliyetler gerektirdiğinden zor bir yöntemdir. Örneğin üç dereceli dört faktörün tüm etkilerini görebilmek için Tam Faktöriyel bir çözümlenme yapıldığında gerçekleştirilecek deneme sayısı 3⁴=81 dir. Yine benzer şekilde 2 dereceli 7 faktör için aynı çözümlenme yapıldığında 2⁷=128 deneme yapmak gerekmektedir. Görüldüğü gibi gerekli deneme sayıları oldukça fazladır. Özellikle benzeşim dışında fiziksel olarak gerçekleştirilmek zorunda olunan alanlarda bu nerdeyse olanaksız hale gelebilmektedir.

İşte bu zorlukları azaltmak için Japon bilim adamı Dr. Genichi Taguchi ortogonal dizilerden oluşan daha az sayıda deneme içeren ancak faktörlerin tüm etkilerini ortaya koyabilen standart tablolar geliştirdi. Taguchi ortogonal dizileri olarak adlandırılan bu tablolar L-4, L-9, L-16, L-32 gibi simgelerle betimlenip rakamlar tablodaki deneme sayılarına işaret etmektedir. Bu tabloların hangisinin seçilmesi noktasında belirli bir ilke olmamakla birlikte faktör sayısı, faktörlerin dereceleri ve faktörler arası etkileşimlerin durumları belirleyici olmaktadır. Tablo-1 yaygın olarak kullanılan standart Taguchi dizilerini göstermektedir. Taguchi tablolarında tüm satır ve sütunlar kendi içlerinde dengeli olup ayrıca faktör etkileşimlerinin etkilerini de içerirler. Taguchi'nin bu dizileri, başta Amerika olmak üzere Avrupa ve Asya'nın birçok uluslar arası kuruluşunda tasarım geliştirme aracı olarak kullanılmaktadır. Sitemin akış dizgesi şu şekilde sıralanır; Planlama, Tasarlama, Yapma, Çözümlenme ve Doğrulama. Bu süreçte faktörlerin ve derecelerinin seçimi oldukça önemlidir. Özellikle faktörlerin doğrusal olup olmadıklarını da hesaba katmak için 3 dereceli çalışma yapmak daha sağlıklı olacaktır[1].

Tablo-1 Yaygın Taguchi Dizileri[1]

Dizi	Faktör sayısı	derece
L-4(2^3)	3	2
L-8(2^7)	7	2
L-12(2^{11})	11	2
L-16(2^{15})	15	2
L-32(2^{11})	31	2
L-9(3^4)	4	3
L-18($2^1, 3^7$)	1	2
	7	3
L-27(3^{13})	13	3
L-16(5^4)	5	4
L-32($2^1, 4^9$)	1	2
	9	4

3.EASMS MAKİNALAR

Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar son yıllarda mıknatıs alanında yaşanan gelişmeler sonucu yüksek güç yoğunluklu olarak tıkHz yapılar da üretilebilmektedirler. Disk makina olarak ta adlandırılan bu makinalar özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr türbinleri için son derece uygundur. Eksenel akılı makinalarda mmk uyarması sürekli mıknatıslarla yapıldığından hava aralığı magnetik akısını elde etmek için en uygun tasarımı elde etmek önemlidir. Çünkü makinanın boyutuna ve ekonomik ederine etki eden faktörlerin en temeli mıknatıs boyutları ve adetleridir. Bu makinalar için geliştirilmiş çıkış eşitliklerinden Güç ve Güç Yoğunluğu eşitlikleri sırasıyla aşağıdaki gibidir [2].

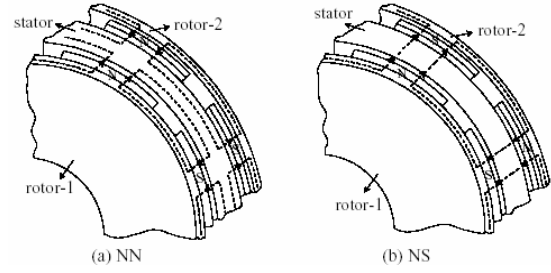
$$P = 2.2\eta K_d B_u A \frac{f}{p} K_L (1 - \lambda^2) (1 + \lambda) D_o^2 L_e \quad (1)$$

$$\xi = 2.76\eta K_d B_u A \frac{f}{p} K_L (1 - \lambda^2) (1 + \lambda) \frac{D_o^2}{D_t^2} \quad (2)$$

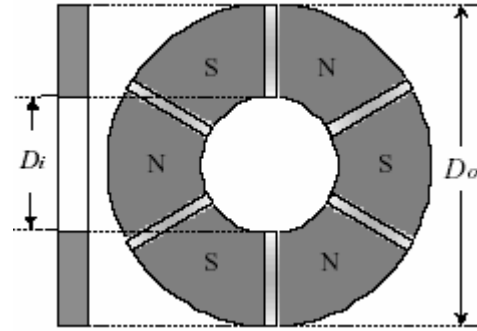
Bu eşitliklerde; $K_d = (1 - p/30)$, B_u : Mıknatıs akısı(Wb), A: toplam elektriksel yüklem(A/m^2), D_o makina etkin dış çapı(mm), D_i iç çap, D_t toplam çap, f frekans, p kutup sayısı, L_e eksenel uzunluk, $K_L = D_o/L_e$ ve son olarak $\lambda = D_i/D_o$ dir. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinalar çok değişik yapılar da modellenebilmektedirler. Bunların en başlıcalarını şöyle sıralayabiliriz[3];

TORUS-NS Ortada oluksuz statorlu,
TORUS- S Ortada oluklu statorlu,
AFIR-NS Oluksuz statorlu ortada rotorlu,
AFIR-S Oluklu statorlu ortada rotorlu.

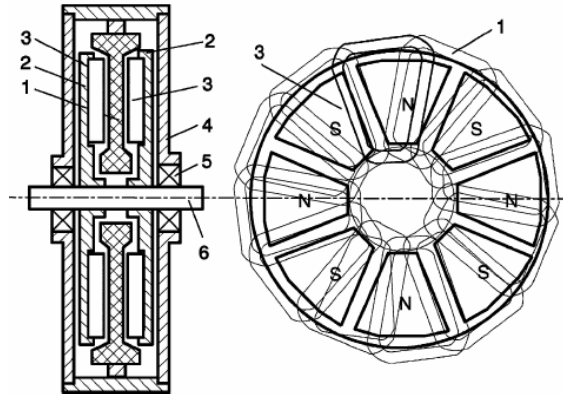
Bunlardan ayrı olarak statoru çekirdekli-çekirdeksiz ve çok modüllü olarak ta yapılabilmektedirler. Şekil-1-5 eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron makinaların değişik yapılarını göstermektedirler.



Şekil-1 NN ve NS tip Eksenel akılı makinalarda akı yolları[3]



Şekil-2 Mıknatıslarla birlikte rotor yapısı[4]



Şekil-3 Çekirdeksiz Statorlu EASMS makinanın basit yapısı. 1:Stator sargıları, 2: Çelik rotor, 3: Sürekli mıknatıslar, 4: Gövde, 5: Vidalar, 6: Mil[5]

4.TASARIM

Başlangıç modeli olarak kullanılan modelin parametrik değerleri Tablo-2'de verildi. Burada verilen değerler genel bir literatür taraması sonucu elde edilmiş ortalama derecelerdir.

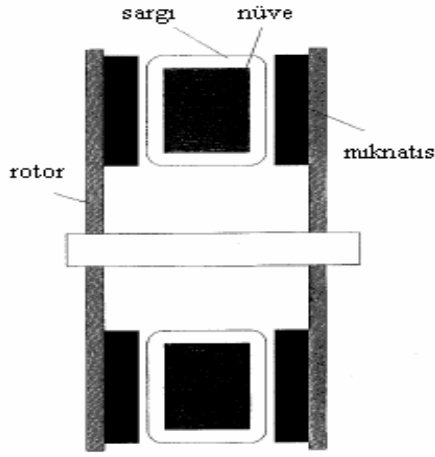
Başlangıç modelinin değerleri verildikten sonra en iyileştirilecek tasarım faktörlerinin değerleri Tablo-3'de gösterilmektedir. En iyileştirme için bu faktörler 3 dereceli olarak denendi.

Tablo-2 Başlangıç modelinin faktör dereceleri

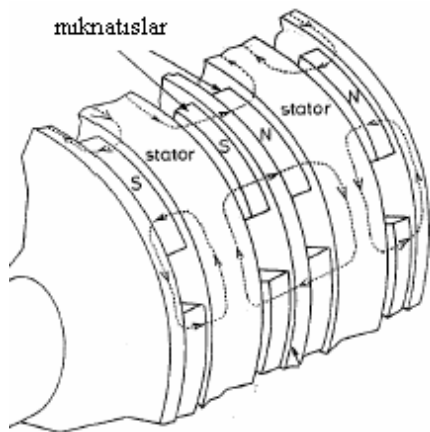
Faktör	Değer
Kutup sayısı, p	8
Mıknatis Yüksekliği, h	6 mm
Dış Çap, D_o	100 mm
İç Çap, D_i	70 mm
Hava aralığı, g	3 mm

Tablo-3 Optimize edilecek aktörler ve dereceleri

Faktör	Derece		
	1	2	3
Kutup sayısı p	4	6	8
İç Çap D_o	80	70	60
Mıknatis Yüksekliği h	5	8	10
Hava Aralığı g	2	3	4



Şekil-4 Ortada statorlu çekirdekli oluksuz statorlu model[6]



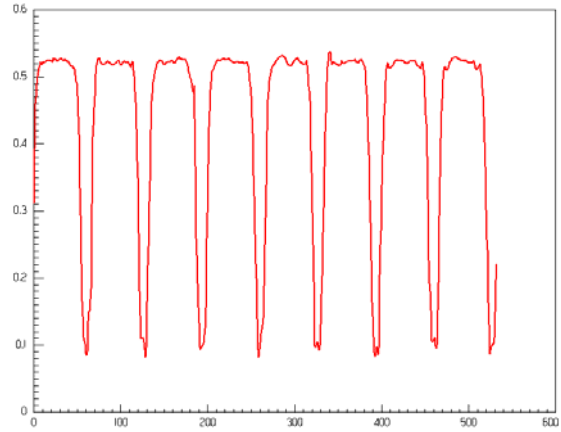
Şekil-5 Çok modüllü generatör modeli[6]

Denemeleri yapmak için L-9(3^4) Taguchi dizisi seçildi. Faktör derecelerinin bu dizideki durumları yani deneme düzenleri Tablo-4'te verildi.

Tablo-4 L-9(3^4) Taguchi tablosu

Deney No	Faktör Dereceleri			
	p	D_i	h	g
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Başlangıç olarak seçilen modelin sayısal alan çözümlenmesi sonucu elde edilen hava aralığı akı eğrisi Şekil-6'da gösterilmektedir.



Şekil-6 Başlangıç modelde hava aralığı akısı

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan sayısal yazılımlarla gerekli denemeler yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel hesaplamalarla çözümlendi. Bu çözümlenmeler sonucunda optimum koşul olarak parametrelerin aşağıdaki değerleri elde edildi.

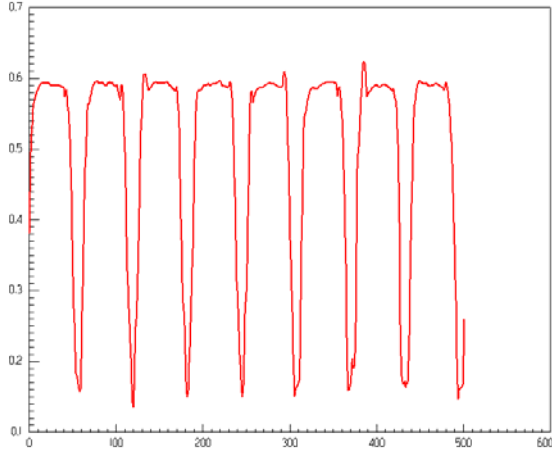
$$p=3(8), D_i=3(60), h=2(8), g=1(2).$$

Bu değerlere göre optimize edilmiş çözümlenme sonucunda hava aralığındaki magnetik akının grafiksel çizimi Şekil-7'de verildi.

İki eğri incelendiğinde optimize edilmiş modeldeki hava aralığı akı değerinin 0.52 Wb'den 0.59 Wb'e yükseldiği görüldü. Bu yadsınamayacak bir başarıdır.

Tablo-5 Başlangıç ve optimum değerler

	p	D_i	h	g
Başlangıç	8	70	6	3
Optimum	8	60	8	2



Şekil-7 Optimum modelde hava aralığı akısı

Birinci model tasarımı bu şekilde sonuçlandırıldıktan sonra 2 dereceli yedi faktöre ait çözümler ise aşağıda verildi. Giriş ayrıtında da belirtildiği gibi bu tasarımda 7 adet faktör 2 dereceli olarak denendi. Tablo-6 bu faktörler ve derecelerini göstermektedir.

Tablo-6 Faktörler ve dereceleri

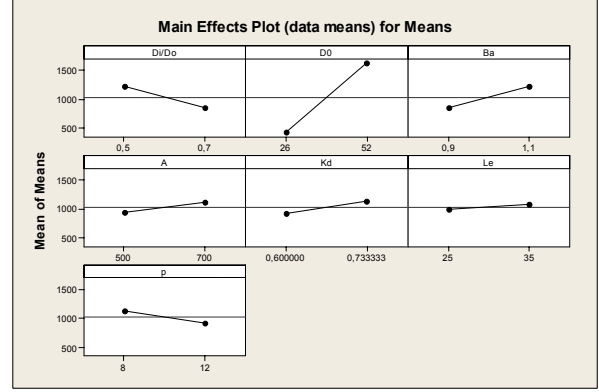
Faktör	D _i /D ₀	D ₀	B _a	A	K _d	L _e	p
1	0.5	25	0.9	500	0.6	25	8
2	0.7	52	1.1	700	0.73	35	12

Tablo-6'da verilen değerler L-9(2⁷) Taguchi Tablosuna yerleştirilip ilgili denemeler yapıldıktan sonra istatistiksel Qualitek-4 limitli yazılımı ile sonuçlar irdelenip ANOVA çözümlenmesi yapıldı. Bunlar toplu faktör etkilerinin çizimsel gösterimleri ile regresyon eşitlikleri olarak sunuldu.

Response Table for Means

Level	D _i /D ₀	D ₀	B _a	A	K _d	L _e	p
1	1213	427,5	842	938,8	921,5	983,3	1135,0
2	843,5	6291214,5	1117,8	1135,0	1073,3	921,5	921,5
Delta	369,5	1201,5	372,5	179,0	213,5	90,0	213,5
Rank	3	1	2	6	4,5	7	4,5

The regression equation is
 $Güç = - 6545 - 3595 D_i/D_0 + 90,9 D_0 + 3618 B_a + 1,68 A + 2940 K_d + 19,1 L_e$



Şekil-8 Faktör etkileri

5.SONUÇ

Yukarıdaki tüm çözümler göstermektedir ki, Deneysel tasarımın özel bir uygulaması olan Taguchi yaklaşımı elektrik makineleri için tasarım modeli geliştirmede son derece yararlı bir araçtır. Özellikle Alan çözümlerini amacına yönelik geliştirilmiş bulunan ve Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan sayısal ticari paketler ile deneysel tasarımı bir arada kullanmak tasarım sürecini çok kısaltacak ve etkinliğini artıracaktır. Makale boyutları göz önüne alınarak burada aksel akı makineleri, Taguchi yöntemi ve yapılan denemeler ile Alan çözümlerini yöntemleri ve ticari yazılımlara yeterince yer verilememiştir. Bu konular üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaştırıldığında ülke endüstrisine ve akademik literatüre yapacağı katkının büyüklüğü kuşkusuzdur.

6.KAYNAKLAR

- [1] R. K.Roy., Design Of Experiments Using The Taguchi Approach, John Wiley& sons, inc., 2001.
- [2] M. Aydın., S. Huang., T. A. Lipo., Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc Machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 53, Issue: 3822-830 ISSN: 0278-0046.
- [3]. S. Huang., M.Aydın.,T.A.Lipo., TORUS Concept Machines:Pre-Prototyping Design Assesment for Two Major Topologies, IEEE 2001, 0-7803-7116-x/01
- [4] M. Aydın., S. Huang., T. A. Lipo., Optimum Design and 3D Finite Element Analysis Of Non-slotted and Slotted Internal Rotor Type Axial Flux PM Disc Machines, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001.
- [5] Rong-Jie Wang., Maarten J. Kamper., Kobus Van der Westhuizen., Jacek F. Gieras., Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 41, No. 1, January 2005.
- [6] E. Spooner., A.C. Williamson., Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications, IEE ProcElectr. Power Appl., Vol. 143, No. 1, January 1996