

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YUVARLAK ROTORLU SENKRON GENERATÖRDE UZAY
HARMONİKLERİNİN UZAY FAZÖRLERİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin DENİZ**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

Haziran 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YUVARLAK ROTORLU SENKRON GENERATÖRDE UZAY
HARMONİKLERİNİN UZAY FAZÖRLERİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin Deniz
(504081018)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Haziran 2011

**Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)
Yrd.Doç.Dr. Özgür Üstün (İTÜ)**

Haziran 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin meydana gelmesi için bana olan desteğini hiçbir zaman esirgemen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca yardımına ihtiyacım olduğunda her zaman değerli fikirleri ile yol gösteren Araş. Gör. Murat İMERYÜZ hocama çok teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Hüseyin Deniz

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. SENKRON MAKİNA MODELİ VE UYARMA ALAN HARMONİKLERİ ..	5
2.1 Mmk Dalgası ve Harmonikleri.....	5
2.2 Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörde Uyarma Alanlarının Fourier Serisi Biçiminde Gösterimi.....	6
2.2.1 Yuvarlak rotorlu bir senkron generatörde rotorunda bir çift oluk bulunması halinde alan şekli.....	7
2.2.2 Yuvarlak rotorlu senkron generatörde rotorda oluk sayısının fazla olması durumunda alan şekli.....	7
2.2.3 Yuvarlak rotorlu senkron generatörde rotorda bir kutup altındaki olukların 2/3 ne uyarma bobinleri yerleştirilip, 1/3 ü boş bırakılması halinde alan şekli.....	8
2.2.4 Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Uzay Harmoniklerinin Eş Değer Devre Oluşturularak İncelenmesi	9
3. UZAY FAZÖRÜ TEORİSİ ve YUVARLAK ROTORLU SENKRON GENERATÖRE UYARLANMASI	11
3.1 Uzay Fazörleri	11
3.1.1 Uyarma akımının uzay fazörünün oluşturulması	13
3.1.2 Rotordaki dönen eksen takımındaki uyarma akımı uzay fazörünün stator duran uzayına indirgenmesi ve indirgeme açısı	14
3.1.3 Çevresel akım yoğunluğunun uzay fazörü ile gösterimi.....	14
3.1.4 Hava aralığı manyetik iletkenliği uzay fazörü ile gösterimi	14
3.1.5 Hava aralığı manyetik alan yoğunluğunun uzay fazörü ile gösterimi	15
3.1.6 Hava aralığı akısı uzay fazörü ile gösterimi.....	15
3.1.7 Endüklenen gerilimin uzay fazörü ile gösterimi	16
3.2 Makine Uzayının Modellenmesi	17
3.2.1 İletken dağılımı	17
3.2.2 Kompleks büyüklük olarak oluk konumları.....	17
3.2.3 Kompleks etkin iletken sayıları.....	18
4. UZAY HARMONİK ETKİLERİNİN MATLAB İLE İNCELENMESİ	19
4.1 Örnek Makinanın Parametreleri	19
4.2 Benzetim Sonuçları	19
4.2.1 Sargı faktörü.....	20
4.2.2 Fourier serisi katsayıları.....	21
4.2.3 Klasik yöntem kullanılarak elde edilen uyarma akısı ve endüklenen gerilim harmonikleri	22

4.2.4 Uzay fazörleri oluşturularak yapılan harmonik analizi verileri	28
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	33
KAYNAKLAR.....	35
EKLER.....	37

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Harmonik derecelerine göre rotor ve stator sargı faktörleri	20
Çizelge 4.2 : Harmonik derecelerine kompleks sargı faktörleri	21
Çizelge 4.3 : Uyarma akımı=1 A için harmonik derecelerinin Fourier serisi katsayıları	22

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Klasik sargı yapısında bir faz alan şeklinin 1 A için genel görünümü[1] ..	5
Şekil 2.2 : Rotorda bir çift oluk bulunması halindeki alan şekli	7
Şekil 2.3 : Rotorda özel oluk dağılımı halindeki trapez alan şekli	8
Şekil 2.4 : Harmonik analizinde kullanılan klasik yöntem için önerilen eşdeğer devre	9
Şekil 3.1 : Makine uzayında sinüs biçimli dağılım gösteren uzay dalgasının n=5 harmoniği [3]	12
Şekil 3.2 : Bir uzay dalgasının uzay fazörü gösterimi [3]	12
Şekil 3.3 : Sargı dağılımı genel matrisi	17
Şekil 3.4 : Harmonik konum vektörleri	18
Şekil 3.5 : Kompleks etkin iletken sayıları matrisi.....	18
Şekil 4.1 : Amper sarım dağılımı harmoniklerinin genliği.....	23
Şekil 4.2 : Uyarma akısı temel bileşenin dağılımı.....	23
Şekil 4.3 : Uyarma akısı 3.harmoniğinin dağılımı.....	24
Şekil 4.4 : Uyarma akısı 5.harmoniğinin dağılımı.....	24
Şekil 4.5 : Uyarma akısı 7.harmoniğinin dağılımı.....	25
Şekil 4.6 : Uyarma akısı etkili harmoniklerinin dağılımı	25
Şekil 4.7 : Uyarma alanı temel bileşenin endüvi sargılarında endüklediği gerilim...	26
Şekil 4.8 : Uyarma alanı 3.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim...	26
Şekil 4.9 : Uyarma alanı 5.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim...	27
Şekil 4.10 : Uyarma alanı 7.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim.	27
Şekil 4.11 : Uyarmada endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı	28
Şekil 4.12 : Statordaki bir olukta oluşan akı dağılımı	28
Şekil 4.13 : Stator faz bantlarında olularda oluşan toplam akı dağılımları	29
Şekil 4.14 : R faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı	29
Şekil 4.15 : S faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı	30
Şekil 4.16 : T faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı.....	30
Şekil 4.17 : Faz Gerilimleri	31
Şekil 4.18 : R fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı	31
Şekil 4.19 : S fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı.....	32
Şekil 4.20 : T fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı	32

YUVARLAK ROTORLU SENKRON GENERATÖRDE UZAY HARMONİKLERİNİN UZAY FAZÖRLERİ İLE ANALİZİ

ÖZET

Alternatif akım makinalarında hava aralığı manyetik alanını bozucu etkiler zaman ve uzay harmonikleri tarafından oluşturulur. Bunlardan zaman harmonikleri günümüz güç kaynaklarını oluşturan güç elektroniği devrelerinin oluşturduğu harmoniklerdir. Bu harmoniklere zaman içinde sinüs biçimli dalga şeklinde değişim göstermeyen, ancak periyodik çıkış işaretlerine sahip kaynaklar sebep olduğu için zaman harmonikleri denir. Zaman harmoniklerinin makine üzerindeki etkileri, yüksek frekanslarda reaktans büyüklüklerinde oluşan bozulmalar nedeni ile daha belirginleşir.

Alternatif akım makinalarının sürekli hal davranışlarının incelemesi yapılırken hava aralığı akı dalgalarının düzgün sinüs biçimli dağılımlı olduğu kabul edilir. Bu kabule dayanarak makinada endüklenen gerilim, çevresel akım yoğunluğu, manyetik akı analizleri yapılır. Fakat bu ideal durum pratikte gerçekleşemez. Makinanın hava aralığında demir çekirdeğin süresiz bir yapıya sahip olması ve iletken dağılımının dolayısı ile amper-sarım dağılımının sinüs biçimli olmaması bunun ana sebebidir. Makinanın hava aralığında konuma da bağlı olarak değişen bu harmonikler uzay harmonikleri olarak anılırlar ve oluşumları ile etkilerinin incelenmeleri zaman harmoniklerinden farklı bir bakış açısı gerektirir.

Bu tezde incelenen yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde uyarma sargısının oluşturduğu uyarma alanı harmoniklerinin statorda oluşturduğu etkileri incelemeye yönelik iki ayrı yöntem tanıtılmış ve örnek incelemeler sunulmuştur.

Uzay harmonikleri makinanın hava aralığındaki amper sarım dağılımı odaklıdır. Hava aralığındaki iletken dağılımı sinüs biçimli olmadığından dolayı uzay harmonikleri oluşur. Uzay harmoniklerinin büyüklükleri makina içindeki konuma ve akımın zamana bağlı değişime bağlıdır. Uzay harmonikleri makinanın doğasından yani konstrüksiyonundan kaynaklanmaktadır.

Bu tezde yuvarlak rotorlu senkron generatörde uzay harmoniklerinin etkileri araştırılmış ve yapılan yazılımla bu etkilerin benzetimi yapılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, uzay harmoniklerinin etkilerinin analizi için iki farklı metod kullanılmıştır. Birincisi, klasik yöntemle incelenen matematiksel model olan Fourier analizi kullanılarak makinanın eşdeğer devresi üzerinden uzay harmoniklerinin endüklenen gerilim, akım yoğunlukları ve akı gibi büyüklüklere etkilerini irdeleyen modeldir. İkincisi ise makine uzayında bulunan her büyüklüğün ilgili harmonik derecesinin konumu ve genliği cinsinden ifade edilmesinden oluşan ve bir kompleks sayı olan uzay fazörleri yardımı ile geliştirilen modelleme metodudur. Uzay fazörleri yöntemi karmaşık matematik ifadelerinin yanında, matris yapısındaki hesap alt yapısı ile uzay harmonikleri incelenmesinin kolaylaşmasına ve hata yapma oranının azalmasına olanak sağlar.

Uzay harmoniklerinin analizi için kullanılan her iki metodun da MATLAB programında yapılan yazılımla benzetimi yapılmıştır. Yapılan yazılımla her iki yöntem de kullanılarak amper sarım harmonikleri, sargı faktörleri, oluk konumları gibi makine uzayı bileşenleri, akı harmonikleri, toplam akı, endüklenen gerilimler ve harmonikleri gibi büyüklükler hesaplanmıştır ve her iki yöntemde ortak olan büyüklükler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. İnceleme sırasında kolaylık açısından boşa çalışan 2 kutuplu, yıldız bağlı bir senkron generatör kullanılmış olup manyetik devre doğrusal, hava aralığı büyüklüğü sabit alınmıştır.

ANALYSIS OF SPACE HARMONICS IN ROUND ROTOR SYNCHRONOUS MACHINES BY USING SPACE PHASOR THEORY

SUMMARY

Time and space harmonics are the causes of disturbing effects on air gap magnetic field in alternating current machines. Power electronic circuits of contemporary supply voltage providing power sources produce the time harmonics. They are identified as time harmonics because they are generated by non sinusoidal waves, characterized by periodic peaks, of supply voltage resources. The higher the disturbance by the reactance magnitude of high frequencies, the more observable the effect of time harmonics on alternating current machine is.

Analysis of induced voltage by the alternating current machines, surrounding flux density and magnetic flux are conducted under the assumption that air gap flux waves have evenly distributed sinusoidal waves. Notwithstanding the fact that assumptions are useful for the scientist to understand and model intriguing phenomena, we recognize that theories does not always map the real world one-on-one. The difference observed in alternating current machine is due to the non-sinusoidal distribution ampere-turn. The underlying reason behind this discrepancy occurs is uneven distribution of conductors due to discrete structure of iron core of the machine. Those harmonics are called space harmonics, which are also contingent upon the location of air gap in alternating current machines. The space harmonics relatively unpredictable structure and effects require a new set of tools to analyze them.

The thesis introduces two different explanatory tools to analyze the effects of space harmonics generated by rotor windings of round rotor synchronous generator. The examples are used to detail the explanations.

Analysis of space harmonics is focused on distribution of flux in air gap of the alternating current machines. Non-sinusoidal distribution of conductors along the air gap roots space harmonics. The magnitude of space harmonics is dependent upon location in the machine and change in the flux with respect to time. Space harmonics are inherent to the machine; they are built in by construction.

The thesis analyzes the effect of space harmonics and produces software to simulate space harmonics effects.

The methodology of the thesis is as follows; the thesis starts with classical mathematical model, Fourier analysis. The Fourier analysis enables us to investigate the effect of space harmonics on various variables such as inducted voltage, flux density and flux by adopting equivalent circuitry of machine examination. The thesis continues with modeling methodology of space phasors. By using space phasors, one can define harmonic level of the every type of magnetic wave in machine space, as

an entity with amplitude and location parameter. The method is of great importance to shorten, ease and correct calculation, with minimum engineering error.

Both Fourier analysis and space phasors methods are processed in MATLAB software to achieve simulation. The software is used to calculate machine space components such as, ampere-turn harmonics, winding factor, slot locations, and entities such as flux, flux harmonics induced voltage and its harmonics.

1. GİRİŞ

Elektrik makinalarının performansını bozucu etkiye sahip harmoniklerden uzay harmonikleri, makina uzayında zamana ve konuma bağı olarak değişim gösterir. Uzay harmonikleri makinanın doğası gereği vardır ve konstrüksiyonundan dolayı meydana gelir. 3 fazlı bir alternatif akım makinasının stator sargıları saf sinüs biçimli kaynaktan beslense bile oluklarda bulunan iletkenler saf sinüs biçiminde dağıtılamadığından gerekli analizler yapıldığında elde edilen manyetomotor kuvvet (mmk) saf sinüs biçimli olmaz. Bu etkinin sebebi amper-sarım değerleri incelendiğinde ortaya çıkmaktadır.

Makina uzayında hava aralığına bakan iletkenler saf sinüs biçiminde dağıtılamadığından sarım sayısı ile akım değeri çarpılarak bulunan amper-sarım değeri sinüs biçimli olmaz. Dağılım, örneğin 1 A için incelendiği zaman, oluk içerensindeki amper-sarımın basamak fonksiyonu şeklinde arttığı düşünülürse mmk ifadesi konuma bağı değişen bir fonksiyon halini alır. Her t zamanındaki akım değeri ile bu ifade çarpıldığında, genliği akıma bağı değişen ama basamaklı bir şekle sahip amper-sarım ifadesi elde edilir. Bu basamaklı alan şekli hava aralığı boyunca elde edildiğinden makina içinde konuma bağıdır. Bu basamaklı alan şekli periyodik bir fonksiyon olarak ifade edilebileceğinden Fourier serisiyle harmonikleri analiz edilebilir.

Bu harmonikler konuma ve akımın zamana bağı değişimine bağıdır. Akım, farklı faz bantlarında ve farklı zaman anlarında farklı değerlere sahip olduğundan, oluklardaki akım dağılımı makina içinde konuma bağı olarak farklılık gösterir [1]. Böyle bir alternatif akım makinasında, stator sargısı tarafından üretilen uzay harmonikleri stator sargısında sabit bir konumda olan stator oluklarına yerleştirilmiş iletkenlerde temel frekansta gerilim endüklerler.

Bu uzay harmonikleri kendilerinden farklı hızda dönen rotor sargılarında ise temel frekansın $6k$ ($k=1,2, \dots$) katı mertebesinde gerilimler endüklerler [1]. Harmoniklerin derecesine bağlı bir biçimde, temel frekanstaki bileşene göre aynı ya da ters yönde dönmeleri söz konusudur. Bu durum asenkron makinada temel bileşeni destekleyecek şekilde çalışan uzay harmoniklerinin generatör çalışmalarına, temel bileşene göre ters dönen harmoniklerin de fren bölgesinde çalışmalarına sebep olur. Her iki durum da kararlı çalışma bölgesinde moment azaltıcı etkiye, kalkış bölgesinde moment dalgalılığı, siren sesi boyutuna ulaşabilen ses gürültüsüne ve ilave kayıplara yol açar.

Tüm bu anlatılanlar ışığında, makina uzayında sinüs biçiminde dağıtılamayan iletkenlerden akan faz akımları, çeşitli frekanslarda uzay harmoniklerine neden olarak elektrik makinalarında moment azaltıcı gibi performans bozucu etki yaratır.

Bu durum sargılardan akan akım doğru akım olduğunda ve uzay harmoniği üreten sargı sabit olmayıp hareketli olduğunda farklı şekilde incelenmelidir. Rotorunda makina uzayında dağılmış halde bir doğru akım sargısı bulunan yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde uyarma akımının zamana bağlı değişimi değeri değiştirilmedikçe sıfırdır. Ancak elde edilen alan şekli yine basamaklı ve periyodik olduğu için uzay harmoniklerinin oluşması kaçınılmazdır. Rotorun döndüğü de düşünülürse, konuma bağlı kendi üst titreşim değişimi değerlerine bağlı oluşan kutup sayısına bağlı bir alan değişimi gerçekleşir. Oluşan basamaklı alanın harmonik bileşenleri stator sargısında ayrı ayrı etkilere sebep olurlar. Rotor bir tam tur attığında oluşan harmoniklerin hepsi farklı hızlarda stator sargılarını keseceklerinden aynı stator sargısında farklı frekanslarda gerilim üreteceklerdir.

Farklı frekanslarda gerilimin üretildiği bir sargının incelenmesi süper pozisyon ilkesi ile yapılmalıdır ve etkiler ayrık biçimde incelenmelidir. Frekans değişiminin yaratacağı etkiler klasik eşdeğer devreye uygulanarak etkiler incelenebilir. Bu etkileri azaltmaya yönelik olarak rotor oluklarının dağılımı ve olukların dolu ya da boş olması ayarlanarak senkron generatörün uyarma alan şekli iyileştirilmeye çalışılmıştır. Makine rotorunda doğru akım ile beslenen uyarma döner alanını oluşturan sargı, bir kutup altındaki $2/3$ oranındaki oluklara yerleştirilip, bir kutup altındaki olukların $1/3$ boş bırakılarak alandaki 3 ve 3 ün katı harmonikler yok edilir. Dolayısıyla alanın kuvvetli bir birinci harmoniği vardır ve endüklenen e.m.k de kuvvetli bir birinci harmonik vardır [2].

Uzay harmonikleri analizi için kullanılabilecek diğerk matematiksel yöntem uzay fazörü teorisidir. Literatür incelendiğinde, uzay fazörlerinin harmonik analizinde J.Stepina, K.P. Kovacs ve L. Serrano-Iribarnegaray' in çalışmalarıyla olgunlaştırıldığı ve analiz için gerekli çalışmayı kısaltıp kolaylaştırıldığı söylenebilir [3-9].

Uzay fazörlerinin harmonik analizine uygun olmasının en önemli sebebi makina uzayında hava aralığında bulunan büyüklüklerin harmonik etkilerinin kutupsal koordinatlarda konum ve büyüklük olarak karmaşık sayılarla tanımlanabilmesidir. Senkron generatörün uyarma alanı uzay harmoniklerinin her biri makine uzayında sinüs biçimli değişen büyüklükler olduğundan, her biri bir uzay fazörü ile ifade edilebilir ve rotor üzerinde tanımlanacak eksen takımı üzerinde konumlandırılabilir. Ancak rotorda sabitlenmiş eksen takımının normal işletme koşullarında senkron hızda döndürüldüğü düşünülürse bu eksenden statora ancak dönüm yolu ile geçilebilir. Bu dönüşüm de elektromekanik enerji dönüşümünün temel prensibi ile örtüşür.

Bu tezde, gerek klasik yöntem ile gerekse uzay fazörleri ile uzay harmonik etkileri teorik olarak incelenmiş, uzay harmoniklerinin yaratabileceği olumsuzlukları inceleyebilmek için bir eşdeğer devre yapısı önerilmiş ve MATLAB yazılımıyla öncelikle klasik matematiksel yöntemle Fourier serisi hesap yöntemleri kullanılarak harmonik analizi yapılmış, ardından da gerekli matrissel tanımlamalarla harmonik etkileri incelenecek olan büyüklüklerin uzay fazörleri oluşturulmuş ve etkiler incelenmiştir.

Olukların konumu $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{q/2}, \alpha_{q/2+1}, \dots, \alpha_q, \dots, \alpha_{2q}$ olsun. Oluk konumları arasındaki mesafe $\Delta\alpha=360^\circ/(3*2q)$ 'dır. Her bir basamağın değeri de N bir oluktaki sarım sayısı olmak üzere amper sarım değerleri $F_1=N, F_2=2N, F_3=3N, \dots$, tepe değer $F_{q/2}=(q/2.N)$, genlik $(q.N)$ olacaktır [1].

Bu alan şekillerinin analizinde kullanılan Fourier serisi mmk dalgasının şekliyle değişeceğinden doğru dağılım analizi için gerçek dalga şekliyle ilgili yaklaşımlar yapılmalıdır. Örneğin eğer iletkenler, bu çalışmada incelenen yuvarlak rotorlu senkron generatörün uyarma sargısında olduğu gibi belirli oluklarında sarılıysa, mmk eğrisi trapez şekilli alınabilir.

İki pi periyotlu bir fonksiyonun Fourier Serisi biçiminde gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^H (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (2.1)$$

Burada, a_0 fonksiyonun ortalama değeridir. a_n, b_n ve a_0 aşağıdaki formüllerden elde edilir.

$$a_0 = (1/T) \int_0^T f(x). dx \quad (2.2)$$

$$a_n = (2/T) \int_0^T f(x). \cos (n\theta) d\theta \quad (2.3)$$

$$b_n = (2/T) \int_0^T f(x). \sin (n\theta) d\theta \quad (2.4)$$

Bir periyodik fonksiyonun çift ya da tek olmasına göre sırası ile sadece a_n ya da b_n katsayılarının, fonksiyonda çeyrek dalga simetrisi varsa sadece tek dereceli katsayılarının olduğu ve diğer bütün harmonik katsayılarının sıfır olduğu unutulmamalıdır [1]. Ayrıca bu tezde incelenen yuvarlak rotorlu senkron generatörün rotor sargılarının da uygulanan özel sargı dağılımından dolayı 3 ve 3'ün katları dereceli harmonik katsayıları da sıfırdır.

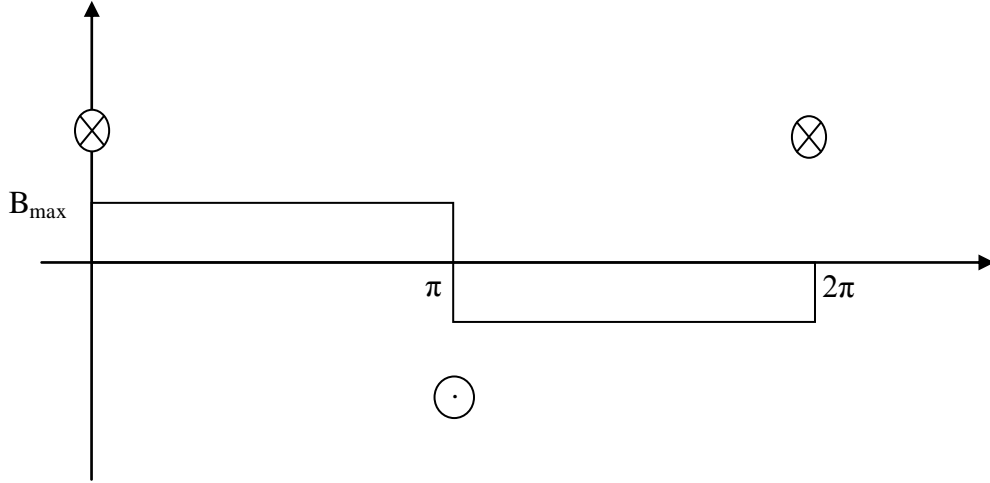
2.2 Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörde Uyarma Alanlarının Fourier Serisi Biçiminde Gösterimi

Senkron generatörlerdeki uyarma alanları periyodik fonksiyonlardır. Bunlar x eksenine göre simetrik ve o orijinine göre simetrik olduklarından $B_0 = 0$ dır ve kosinüslü terimler ile çift harmonikler bulunmaz [2].

Aşağıda çeşitli rotor oluk dağılımlarına göre uyarma alanı şekilleri ve bunların Fourier serileri verilmiştir.

2.2.1 Yuvarlak rotorlu bir senkron generatörde rotorunda bir çift oluk bulunması halinde alan şekli

Böyle bir uyarma sargısına sahip makinanın alan şekli, Şekil 2.2 de gösterildiği gibi dikdörtgendir.



Şekil 2.2 : Rotorda bir çift oluk bulunması halindeki alan şekli

$$B_{n\max} = (2/\pi) \int_0^\pi B(x) \cdot \sin nx \, dx \quad (2.5)$$

$$= (4/\pi) B (1/n) \quad (2.6)$$

Eğer alan şeklinin Fourier serisi yazılmak istenirse;

$$B_n(x) = (4/\pi) B [1 \cdot \sin x + 1/3 \sin 3x + 1/5 \sin 5x + \dots + 1/n \sin nx] \quad (2.7)$$

n, harmonik derecesini göstermektedir.

2.2.2 Yuvarlak rotorlu senkron generatörde rotorda oluk sayısının fazla olması durumunda alan şekli

Rotorda q adet çift oluk bulunuyorsa hava aralığı alan şekli trapezoidal oluşur. Bu durumda

$$B_{\max} = \sum_{i=1}^{i=q} B_i = q \cdot B \quad (2.8)$$

Harmonikler için Fourier serisi oluşturulmak istenirse ve alan şeklinin bir çift oluk için dikdörtgen olduğu düşünülürse;

$$B_{nmax1} = (4/\pi) B (1/n) \quad (2.9)$$

$$B_{nmax} = \xi_{yn} \cdot \sum_{i=1}^{i=q} B_{nmax_i} = \xi_{yn} \cdot q \cdot B_{vn} \quad (2.10)$$

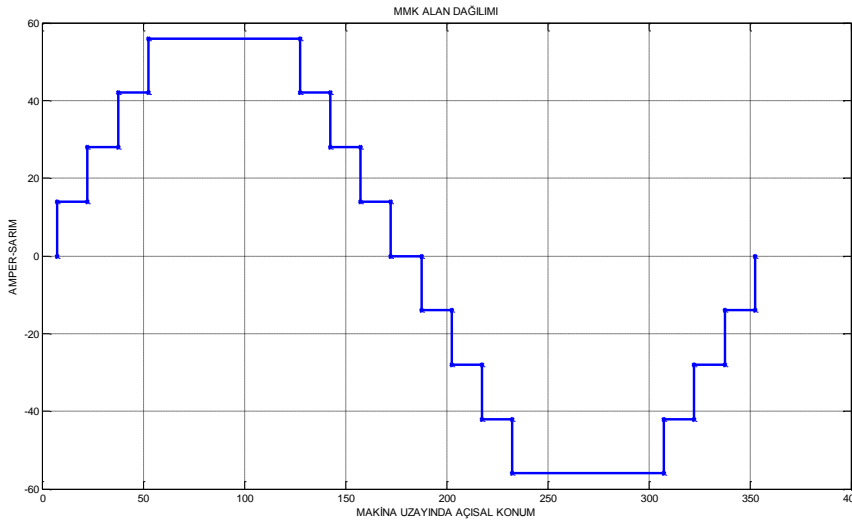
$$B_{nmax} = \xi_{yn} \cdot q \cdot B_{max} \cdot (4/\pi) \cdot (1/n) \quad (2.11)$$

$$B_n(x) = (4/\pi) B_{max} [\xi_{y1} \cdot \sin x + 1/3 \xi_{y3} \cdot \sin 3x + 1/5 \xi_{y5} \sin 5x + \dots + 1/n \xi_{yn} \sin nx] \quad (2.12)$$

n, harmonik derecesini göstermektedir.

2.2.3 Yuvarlak rotorlu senkron generatörde rotorda bir kutup altındaki olukların 2/3 ne uyarma bobinleri yerleştirilip, 1/3 ü boş bırakılması halinde alan şekli

Bu tezde incelenen makinanın da sahip olduğu bu iletken dağılımı yapısının makine hava aralığında oluşturduğu alan şekli trapezoidaldir. Şekil 2.3 analizi yapılan senkron generatörün alan şeklidir.



Şekil 2.3 : Rotorda özel oluk dağılımı halindeki trapez alan şekli

$$B_{nmax} = (4/\pi) \int_0^\alpha (B_{max}/\alpha) \cdot x \cdot \sin nx \, dx + (4/\pi) \int_\alpha^{\pi/2} (B_{max}) \cdot \sin nx \, dx \quad (2.12)$$

$$B_{nmax} = (4/\pi) \cdot \frac{B_{max}}{\alpha} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \sin nx \quad (2.13)$$

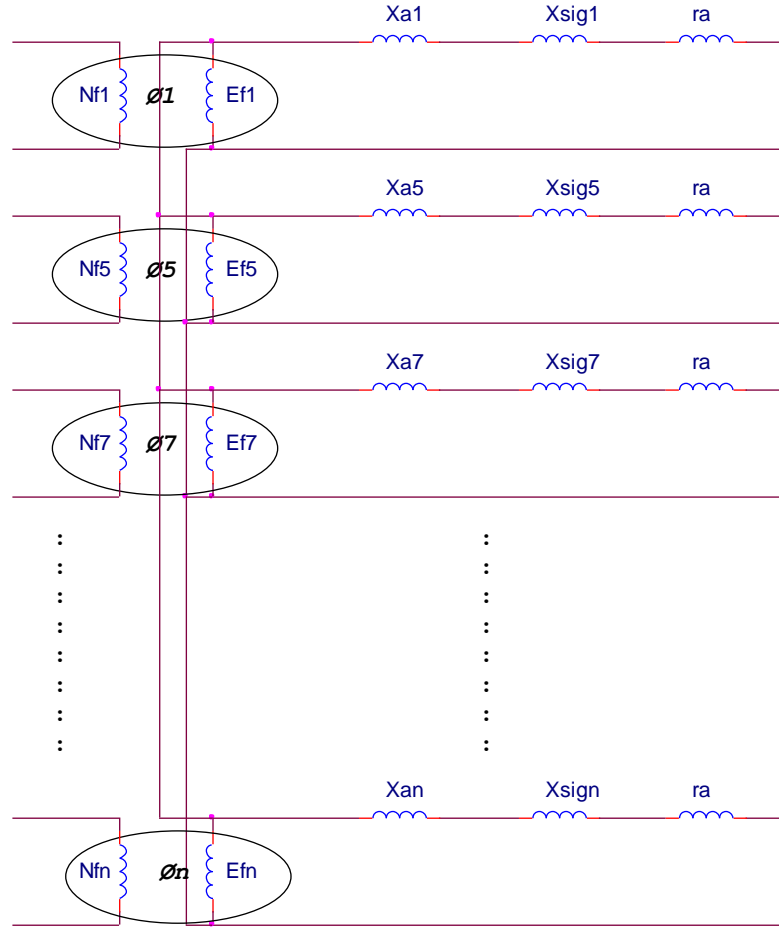
$$B_n(x) = (4/\pi) \frac{B_{max}}{\alpha} [\sin \alpha \cdot \sin x + 1/9 \sin 3\alpha \cdot \sin 3x + 1/25 \sin 5\alpha \sin 5x + \dots + 1/n^2 \sin n\alpha \sin nx] \quad (2.14)$$

n, harmonik derecesini göstermektedir.

2.2.4 Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Uzak Harmoniklerinin Eş Değer Devre Oluşturulması

Bu çalışmada, makina uzayında bulunan dalgaların harmonikleri incelenmiş ve analizi yapılmıştır. Uzak harmoniklerinin analizi için klasik yöntem olarak amper-sarım dağılımı harmoniklerinin Fourier serisi olarak açılmıştır.

Klasik yöntem kullanılarak uzak harmoniklerinin etkilerini inceleyebilmek için bir eşdeğer devre yapısı önerilmiştir. Şekil 2.4 önerilen eşdeğer devre görülmektedir.



Şekil 2.4 : Harmonik analizinde kullanılan klasik yöntem için önerilen eşdeğer devre

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere makinada elde edilen alan şekli basamaklı ve periyodik olduğu için uzay harmoniklerinin oluşması kaçınılmazdır. Rotorun dönmesi ile oluşan bu basamaklı alan dalgasında konuma bağlı olarak kendi üst titreşim değerleri sayesinde bir alan değişimi oluşur. Bu alan dalgasının harmonik bileşenleri stator sargısında ayrı ayrı etkilere sebep olurlar. Rotor bir tam tur attığında oluşan harmoniklerin hepsi farklı hızlarda stator sargılarını keseceklerinden aynı stator sargısında farklı frekanslarda gerilim üreteceklerdir.

Eş değer devre oluşturulurken süper pozisyon ilkesi göz önüne alınmıştır. Çünkü farklı frekanslarda gerilimin üretildiği bir sargının incelenmesi süper pozisyon ilkesi ile yapılmalıdır ve etkiler ayrık biçimde incelenmelidir. Frekans değişiminin yaratacağı etkiler klasik eşdeğer devreye uygulanarak etkiler incelenebilir. Bu bilgiler ışığında, eşdeğer devre üzerinden devre analizi yapılırsa;

$$F_{fegen} = N_e \cdot I_f \quad (2.15)$$

$$N_e = k w_{fe} \cdot N_f \quad (2.16)$$

$$F_{fegen} = k w_{fe} \cdot N_f \cdot I_f \quad (2.17)$$

$$F_{fe} = F_{fegen} \cdot \cos (2\pi f \cdot e) \quad (2.18)$$

$$\omega_e = 2\pi \cdot \frac{n_s \cdot p \cdot e}{60} = 2\pi f \cdot e \quad (2.19)$$

$$F_{fe} = F_{fegen} \cdot \cos (\omega_e) \quad (2.20)$$

$$A_{k1} = \emptyset_{fe} = \frac{\text{Amper-sarım}}{\text{Manyetik Direnç}} = \frac{F_{fegen}}{\mathcal{R}} \cdot \cos (\omega_e t) \quad (2.21)$$

Belirli bir olukta e. harmonik için endüklenen gerilim;

$$\text{Endüklenen Gerilim} = E_{fe} = \frac{d\emptyset_{fe}}{dt} = \frac{F_{fegen}}{\mathcal{R}} \cdot 2\pi f \cdot e \cdot \sin (\omega_e t) \quad (2.22)$$

Gerilim için genel ifade;

i. olukta e.harmonik için endüklenen gerilim

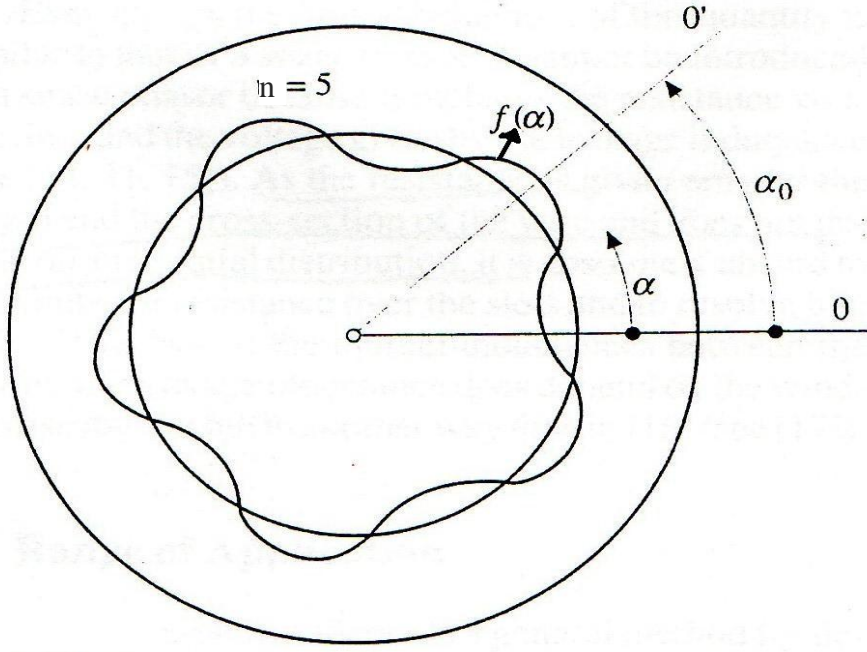
$$E_{fe_i} = \frac{F_{fegen}}{\mathcal{R}} \cdot 2\pi f \cdot e \cdot \sin (\omega_e t - (i-1) \cdot \gamma_{elek_e}) \quad (2.23)$$

3. UZAY FAZÖRÜ TEORİSİ ve YUVARLAK ROTORLU SENKRON GENERATÖRE UYARLANMASI

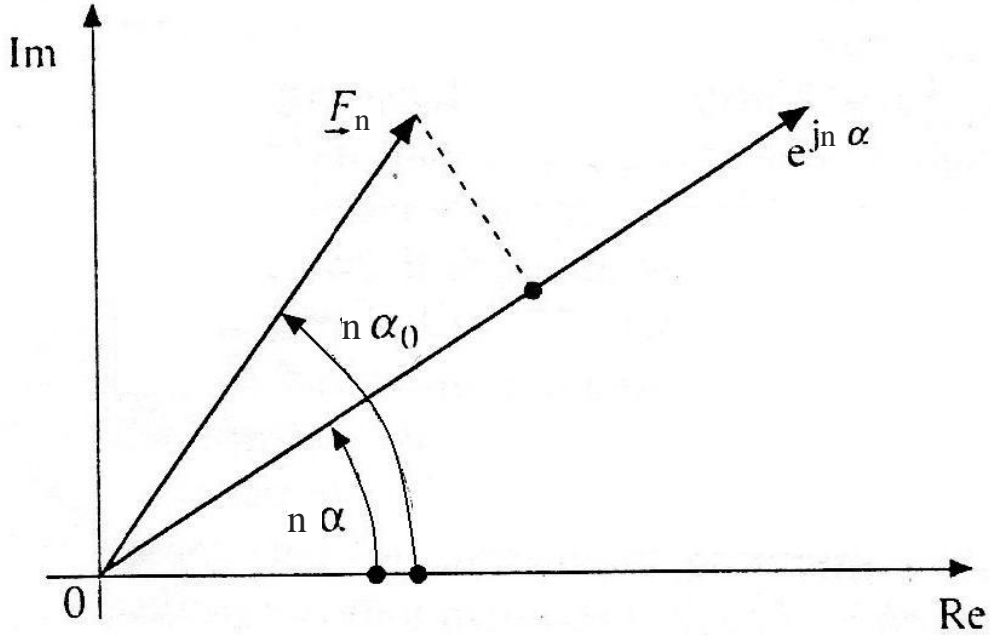
3.1 Uzay Fazörleri

Elektrik makinası modellemenin klasik teorisi, makina içi uzayda dağılmış elektromanyetik büyüklüklerin Fourier serileriyle trigonometrik fonksiyonlar formunda gösterilmesine dayanır [3]. Bu makina içi temel büyüklüklerinden; endüklenen gerilim, çevresel akı yoğunluğu, akı, magnetik akı yoğunluğu zamana göre sinüsoidal biçimde değişir. Bu büyüklükler kartezyen koordinat düzleminde zaman fazörleri ile gösterilebilir. Fakat bu büyüklüklerin denklemlerinin zaman boyutunda incelenmesi zor olması ve denklem sayılarının faz sayısı ile doğru orantılı olarak arttığından uzun bir analiz süreci gerektirdiğinden, bu büyüklüklerin değişimleri makina uzayında kompleks düzlemde karmaşık sayılar ile ifade edilmesi makinanın incelenmesini kolaylaştırır. Ayrıca elektrik makinalarının sahip olduğu silindirik yapı, kutupsal koordinat kullanılmasını kolaylaştırır. Özetle, uzay fazörü teoremi makina içi uzayda periyodik dağılan elektromanyetik büyüklüklerin fazörler şeklinde kompleks düzlemde kompleks sayılarla gösterimine olanak sağlar.

Uzay fazörü, tanım olarak, makina uzayında sinüs biçimli değişim gösteren bir büyüklüğün, kompleks düzlemde her an için bu büyüklüğün uzaysal dağılımını ifade eden yönlendirilmiş parçasıdır [7].



Şekil 3.1 : Makine uzayında sinüs biçimli dağılım gösteren uzay dalgasının $n=5$ harmoniği [3]



Şekil 3.2 : Bir uzay dalgasının uzay fazörü gösterimi [3]

$$f(\alpha) = F \cos (\alpha - \alpha_0) \quad (3.1)$$

$f(\alpha)$ fonksiyonu makina uzayında kompleks düzlemde uzay fazörü biçiminde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= 1/2 \cdot F \cdot [e^{j(\alpha-\alpha_0)} + e^{-j(\alpha-\alpha_0)}] \\ &= \text{Re} [F \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{-j\alpha_0}] \\ &= \text{Re} [\mathbf{F} \cdot \mathbf{r}^*(\alpha)] \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{F} = F \cdot e^{j\alpha} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{r}(\alpha) = e^{j\alpha} \quad (3.4)$$

Denklem (3.3) de tanımlanan \mathbf{F} ele alınan makina iç uzayında periyodik olarak sinüsoidal dağılmış uzay dalgasının uzay fazörüdür.

Denklem (3.4) da tanımlanan $\mathbf{r}(\alpha)$ vektörü makina uzayında, uzay dalgasının fazörünün bulunduğu herhangi bir konumu α kutupsal koordinatıyla kompleks düzlemde tanımlar.

\mathbf{F} uzay fazörünün tanımında verilen genliği F , ilgili dalğanın genliğidir. Bu büyüklüğün konumu dalğanın maksimum değerini aldığı herhangi bir uzay konumunda belirlenir. Bu konum, α_0 açısı ile $\mathbf{r}_0(\alpha)$ konum vektörüyle belirlenir.

Herhangi bir uzay dalgasının harmonikleri için uzay fazörleri aşağıdaki gibi yazılabilir [4].

$$\begin{aligned} f_n(\alpha) &= \text{Re} [F \cdot e^{j n(\alpha-\alpha_n)}] \\ &= \text{Re} [\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{r}_n^*(\alpha)] \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.1.1 Uyarma akımının uzay fazörünün oluşturulması

Uzay harmoniklerinin analizi için uyarma akımının uzay fazörünü modellemesini oluşturan iki temel bileşen vardır. Bunlar iletken dağılımı matrisinden elde edilen genlikler ve bu iletkenlerin bulunduğu olukların rotor uzayında yerlerini gösteren konum vektörleri matrisidir. Bu iki bileşenin matrissel çarpımı ile uyarma akımının uzay fazörü elde edilir. Bu akım her bir uzay harmonik derecesi için hesaplanır.

$$\mathbf{I}_{nfr} = I_{gen} \cdot \mathbf{r}_{nx} \quad (3.7)$$

\mathbf{I}_{nfr} , n. dereceden uzay harmoniğinin uyarma akımı uzay fazörü

I_{gen} , ilgili oluktaki iletken dağılımı genliği

r_{nx} , kompleks oluk konumu

3.1.2 Rotordaki döner eksen takımındaki uyarma akımı uzay fazörünün stator duran uzayına indirgenmesi ve indirgeme açısı

Rotor döner uzayında sargılarda oluşan akı sayesinde endüklenen gerilim, iletkenlerde uyarma akımının akmasını sağlar. Bir önceki bölümde bu akımın uzay fazörü şeklinde gösterimi anlatılmıştır. Bundan sonraki adım senkron generatörde yükü besleyen stator sargılarına bu akımın uzay harmoniğinin etkilerinin indirgenmesi ve bu dönüşümü konumsal olarak yapabilmemizi sağlayan indirgeme açısının oluşturulmasıdır. Bu indirgeme işlemi rotor döner uzayında her bir uzay harmoniğinin her bir oluktaki etkisinin statora taşınmasına olanak sağlar. İndirgeme açısı, kompleks düzlemde polar koordinatlarda ilgili uzay harmoniği derecesinin rotordaki konumunu rotordaki açisal hızının zamana bağlı değişimiyle elde edilir.

$$\mathbf{I}_{nfrs} = \mathbf{I}_{nfr} \cdot e^{jn \alpha_n} \quad (3.8)$$

\mathbf{I}_{nfrs} , rotor akımı fazörünün stator uzayına indirgenmiş uzay fazörü

\mathbf{I}_{nfr} , n. dereceden uzay harmoniğinin uyarma akımı uzay fazörü

$e^{jn \alpha_n}$, indirgeme açısının kompleks düzlemde polar koordinatlarda gösterimi

3.1.3 Çevresel akım yoğunluğunun uzay fazörü ile gösterimi

Çevresel akı yoğunluğu makine uzayında sinüs biçimli dağıldığından uzay fazörü gösterimi yapılabilir.

$$A_a(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i_a}{\pi} \cos n(\alpha - \alpha_n) \quad (3.9)$$

$$= \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [i_a \cdot e^{jn \alpha_a} \cdot e^{-jn \alpha}]$$

$$= \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [\mathbf{i}_{na} \cdot \mathbf{r}_n^*(\alpha)] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{i}_{na} = i_a \cdot e^{jn \alpha_a} = i_a \cdot \mathbf{r}_{na} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{r}_n(\alpha) = e^{jn \alpha} \quad (3.12)$$

3.1.4 Hava aralığı manyetik iletkenliği uzay fazörü ile gösterimi

Yuvarlak rotorlu senkron generatörde, çıkık kutuplu makinaya göre hava aralığı dağılımı uzay fazörü oluşturmak için daha uygundur.

$$\lambda(\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n \cdot \cos n(\alpha - \alpha_n) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}\lambda(\alpha) &= \sum_{n=0}^{\infty} \text{Re} [\lambda_n \cdot e^{jn\alpha_n} \cdot e^{-jn\alpha}] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \text{Re} [\Lambda_n \cdot \mathbf{r}_n^*(\alpha)]\end{aligned}\quad (3.14)$$

$$\Lambda_n = \lambda_n \cdot e^{jn\alpha_n} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{r}_n(\alpha) = e^{jn\alpha} \quad (3.16)$$

Bu tezde, işlem kolaylığı için hava aralığı manyetik iletkenliğinin uzay fazörü bileşenlerinden sadece temel bileşen olan Λ_0 göz önüne alınmıştır. Böylece makine hava aralığı sabit kabul edilmiştir. Yapılan yazılım bu kabul ile oluşturulmuştur.

3.1.5 Hava aralığı manyetik alan yoğunluğunun uzay fazörü ile gösterimi

Makine uzayında sinüs biçimli değişim gösteren bir diğer büyüklük olan hava aralığı manyetik alan yoğunluğu da kompleks düzlemde bir karmaşık sayı olarak uzay fazörü şeklinde gösterilebilir.

$$B(\alpha) = \mu_0 \lambda(\alpha) \int A(\alpha) d\alpha \quad (3.17)$$

Daha önceki bölümlerde uzay fazörlerini oluşturduğumuz çevresel akı yoğunluğu ve hava aralığı manyetik iletkenliğini Denklem (3.15) de yerlerine koyulursa, hava aralığı manyetik alan yoğunluğunu uzay fazörü şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$B_n(\alpha) = \mu_0 \lambda_0 \int \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \mathbf{r}_n^*(\alpha)] d\alpha \quad (3.18)$$

$$= \frac{\mu_0 \lambda_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \int e^{-jn\alpha} d\alpha]$$

$$= \frac{\mu_0 \lambda_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot \frac{-1}{jn} \cdot e^{-jn\alpha}]$$

$$= \frac{\mu_0 \lambda_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot \frac{-1}{j} \cdot \mathbf{r}_n^*(\alpha)] \quad (3.19)$$

3.1.6 Hava aralığı akısı uzay fazörü ile gösterimi

Hava aralığında oluşan akı, uzay harmoniği incelemesinde kullanılan en temel büyüklüklerdendir. Hava aralığında oluşan akı dalgası sinüs biçimli değişim gösterdiğinden uzay fazörü oluşturulabilir.

$$\Phi = -\frac{1}{2} D l \int B(\alpha) d\alpha \quad (3.20)$$

B, manyetik alan yoğunluğu Denklem (3.18) yerine konursa, hava aralığı akısının uzay fazörü aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\Phi_n = -\frac{1}{2} D l \int \frac{\mu_0 \lambda_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \operatorname{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot \frac{-1}{j} \cdot \mathbf{r}_n^* (\alpha)] d\alpha \quad (3.21)$$

$$\Phi_n = \frac{1}{2\pi} D \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \operatorname{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot \mathbf{r}_n^* (\alpha)] \quad (3.22)$$

3.1.7 Endüklenen gerilimin uzay fazörü ile gösterimi

Makine uzayında bir iletken, herhangi bir anda oluşan manyetik alanın oluşturduğu akının miktarının zamana göre değişimi Faraday yasasına göre ilgili iletkende gerilim endükler. Endüklenen gerilimi sinüs biçimli olduğundan, değişen akı miktarı üzerinden uzay fazörü şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

Tek bir iletkendeki akı uzay fazörü en genel haliyle şu şekilde yazılabilir.

$$\Phi(\alpha_0) = \Phi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{Re} [\Phi_n \mathbf{r}_n^*] \quad (3.23)$$

Tüm iletkenlerdeki toplam akının uzay fazörünü aşağıdaki şekilde oluşturabilir.

$$\begin{aligned} \Psi &= \sum \Phi(\alpha) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} N \cdot \operatorname{Re} [\Phi_n \mathbf{k}_n^*] \end{aligned} \quad (3.24)$$

\mathbf{k}_n^* , n. uzay harmoniğinin kompleks sargı faktörü. N iletken sarım sayısıdır.

Denklem (3.22) uzay fazörü biçiminde yazılan toplam akı, endüklenen gerilimin uzay fazörünü elde etmek için eşitlikte yerine yazılır.

$$\mathbf{v}_n = -\frac{d\Psi_n}{dt} = -\frac{N_a}{q_a} \frac{d\Phi_n}{dt} = -\frac{N_a}{q_a} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2\pi} D \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \operatorname{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot \mathbf{r}_n^* (\alpha)] \right) \quad (3.25)$$

\mathbf{I}_{nfrs} ' yi tanımdan gelen şekilde açıp denklem (3.24) te yerine koyarsak;

$$\mathbf{v}_n = -\frac{N_a}{q_a} \frac{1}{2\pi} D \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \frac{d}{dt} \left(\operatorname{Re} [\mathbf{I}_f \cdot \mathbf{e}^{jn\alpha_a} \cdot \mathbf{e}^{j\omega t} \cdot \mathbf{e}^{jn\alpha}] \right) \quad (3.26)$$

$$\mathbf{v}_n = -\frac{N_a}{q_a} \frac{1}{2\pi} D \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \operatorname{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot j\omega \cdot \mathbf{r}_n^* (\alpha)] \quad (3.27)$$

$$\mathbf{v}_n = -\frac{N_a}{q_a} D \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0 \cdot f_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \operatorname{Re} [\mathbf{I}_{nfrs} \cdot j \cdot \mathbf{r}_n^* (\alpha)] \quad (3.28)$$

Bu ifade ile elde edilen gerilim, α_a konumundaki oluktaki rotor iletkenlerinin oluşturduğu akının statora indirgenmiş halinin α_{as} konumundaki oluktaki stator iletkenlerinde endüklediği gerilimdir.

3.2 Makine Uzayının Modellenmesi

Bu tezin amacı olan uzay harmoniklerinin uzay fazörleriyle analizi için gerekli olan modellemenin yapılması öncelikle makine uzayının oluşturulmasını gerektirmektedir. Bu analiz için sargı yapısı, iletken dağılımı, oluk konumları bu konumlardaki büyüklüklerin modellenmesi gerekir. Bu bileşenler matrisler oluşturularak modellenmiştir.

3.2.1 İletken dağılımı

Analiz için gereken modelde iletkenlerin dağılımı matris formunda kolayca ifade edilebilir. Aşağıda Şekil 3.3 de verilen sargı dağılımı genel matrisidir. Senkron generatörün yapısından kaynaklanan rotor da tek fazlı, endüvide üç fazlı olma durumu bu genel matrisin her iki durumda da kullanılmasına olanak sağlamıştır.

$$[z] = \begin{array}{c} \text{Oluklar} \downarrow \\ a \\ b \\ c \\ \dots \end{array} \begin{array}{c} \text{Fazlar} \rightarrow \\ R \quad S \quad T \quad \dots \\ \left[\begin{array}{ccc} z_{aR} & z_{aS} & z_{aT} \\ z_{bR} & z_{bS} & z_{bT} \\ z_{cR} & z_{cS} & \end{array} \right] \end{array}$$

Şekil 3.3 : Sargı dağılımı genel matrisi

İletken matrisi $[z]$, makinada var olan olukların konumunu ve bu olukta iletkenin geçen akımın yönü ile birlikte hangi faza ait kaç sarım olduğunu gösterir. Bu matriste sütunlar oluklardan, satırlar fazlardan oluşmaktadır. Matris oluşturulurken akımın yönüne dikkat edilmiş olduğundan matris içinde artı ve eksi değerli elemanlar bulunmaktadır. Bu metod sayesinde herhangi bir sayıda oluk veya faz için ve keyfi dağılımlı sargı matrisleri oluşturulabilir [1]..

3.2.2 Kompleks büyüklük olarak oluk konumları

Uzay fazörlerinin üzerine kurulduğu teorem, makine uzayının büyüklüklerini kompleks düzlemde konum ve genlik bilgileriyle oluşturabilmektir. Şekil 3.4 de görülen matris, n. dereceden harmonikler için olukların kompleks uzayda konumlarını belirten birim uzunluktaki vektörlerdir. Bu vektörler, polar koordinatta α konum açılarıyla ilgili olukların yerlerini makine uzayında gösterir. Matris elemanları $[r_{nx} = e^{jn\alpha_x}]$ şeklinde oluşturulur [1]..

$$\begin{array}{c}
n \downarrow \\
\mathbf{1} \\
\mathbf{2} \\
\mathbf{3} \\
\dots
\end{array}
\begin{array}{c}
\text{Oluklar} \rightarrow \\
a \quad b \quad c \quad \dots \\
\left[\begin{array}{ccc}
\underline{r}_{1a} & \underline{r}_{1b} & \underline{r}_{1c} \\
\underline{r}_{2a} & \underline{r}_{2b} & \underline{r}_{2c} \\
\underline{r}_{3a} & \underline{r}_{3b} & \\
\dots & &
\end{array} \right]
\end{array}$$

Şekil 3.4 : Harmonik konum vektörleri

3.2.3 Kompleks etkin iletken sayıları

Yukarıda verilen sargı dağılımı ve oluk konumları matrislerinin çarpımıyla elde edilen kompleks etkin iletken sayıları matrisi, çeşitli uzay harmonikleri için ilgili fazların kompleks iletken sayılarını içerir. Kompleks etkin iletken sayıları, harmoniklerin kompleks düzleminde fazların uzay konumunu temsil eder.

Eğer bu matrisin bir harmonik derecesi için olan elemanlarının toplamını ilgili fazdaki iletken sayısına bölünürse, işlem yapılan harmonik derecesi için kompleks sargı faktörü k_{wn} bulunur. Bu kompleks değerin mutlak büyüklüğü klasik anlamdaki sargı faktörüne karşı gelir ve kompleks düzlemdaki konumu da ilgili fazın konumunu temsil eder [1]..

$$\begin{array}{c}
n \downarrow \\
\mathbf{1} \\
\mathbf{2} \\
\mathbf{3} \\
\dots
\end{array}
\begin{array}{c}
\text{Fazlar} \rightarrow \\
R \quad S \quad T \quad \dots \\
\left[\begin{array}{ccc}
\underline{S}_{1R} & \underline{S}_{1S} & \underline{S}_{1T} \\
\underline{S}_{2R} & \underline{S}_{2S} & \underline{S}_{2T} \\
\underline{S}_{3R} & \underline{S}_{3S} & \\
\dots & &
\end{array} \right]
\end{array}$$

Şekil 3.5 : Kompleks etkin iletken sayıları matrisi

4. UZAY HARMONİK ETKİLERİNİN MATLAB İLE İNCELENMESİ

Bu tezde, uzay harmoniklerinin analizi için kullanılan klasik metodu ve uzay fazörü metodu yapılan MATLAB yazılımıyla gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

4.1 Örnek Makinanın Parametreleri

Yazılım için kullanılan örnek makinanın büyüklükleri şu şekildedir[11];

24 kV 500 MVA 60 Hz

$Q_r = 24$, Rotor oluk sayısı.

$Q_s = 60$, Stator üç faz oluk sayısı.

$N_f = 14$, Rotorda bir oluktaki sarım sayısı.

$N_a = 20$, Statordaki toplam sarım sayısı.

$L_a = 2.76e-3$ H, Endüvi endüktans değeri.

$L_\sigma = 1.84e-4$ H, Kaçak endüktans değeri.

$\ell = 3.28$ m, Makinanın demir çekirdek boyu.

$D = 1.12$ m, Makinanın rotor çapı.

4.2 Benzetim Sonuçları

Yapılan Matlab yazılımıyla incelenen yuvarlak rotorlu senkron generatörün uzay harmonikleri analizi için gerekli büyüklükler oluşturulmuş ve uzay harmoniklerinin etkileri gözlenmiştir. Tüm bu incelemeler senkron generatörün boшта çalıştığı durum için gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Sargı faktörü

İncelenen makinede ilgili harmonik dereceleri için elde edilen rotor ve stator sargı faktörleri şöyle bulunmuştur.

Çizelge 4.1 : Harmonik derecelerine göre rotor ve stator sargı faktörleri.

Harmonik Derecesi	Rotor Sargı Faktörü	Stator Sargı Faktörü
1	0.8294	0.9554
3	0	0.6392
5	0.1778	0.1932
7	0.1365	0.1395
9	0	0.2203
11	0.1092	0.0918
13	0.1092	0.0795
15	0	0.1414
17	0.1365	0.0643
19	0.1778	0.0596
21	0	0.1122
23	0.8294	0.0536
25	0.8294	0.0518
27	0	0.1012
29	0.1778	0.0501
31	0.1365	0.0501
33	0	0.1012
35	0.1092	0.0518
37	0.1092	0.0536
39	0	0.1122
41	0.1365	0.0596

Çizelge 4.2 : Harmonik derecelerine kompleks sargı faktörleri

Harmonik Derecesi	Kompleks Sargı Faktörü	Kompleks Sargı Faktörü (Mutlak Değeri)	Rotor Sargı Faktörü (Klasik Model)
1	$0.1083 + 0.8223i$	0.8294	0.8294
3	0	0	0
5	$-0.1083 - 0.1411i$	0.1778	0.1778
7	$-0.1083 - 0.0831i$	0.1365	0.1365
9	0	0	0
11	$0.1083 + 0.0143i$	0.1092	0.1092
13	$0.1083 - 0.0143i$	0.1092	0.1092
15	0	0	0
17	$-0.1083 + 0.0831i$	0.1365	0.1365
19	$-0.1083 + 0.1411i$	0.1778	0.1778
21	0	0	0
23	$0.1083 - 0.8223i$	0.8294	0.8294
25	$0.1083 + 0.8223i$	0.8294	0.8294
27	0	0	0
29	$-0.1083 - 0.1411i$	0.1778	0.1778
31	$-0.1083 - 0.0831i$	0.1365	0.1365
33	0	0	0
35	$0.1083 + 0.0143i$	0.1092	0.1092
37	$0.1083 - 0.0143i$	0.1092	0.1092
39	0	0	0
41	$-0.1083 + 0.0831i$	0.1365	0.1365

4.2.2 Fourier serisi katsayıları

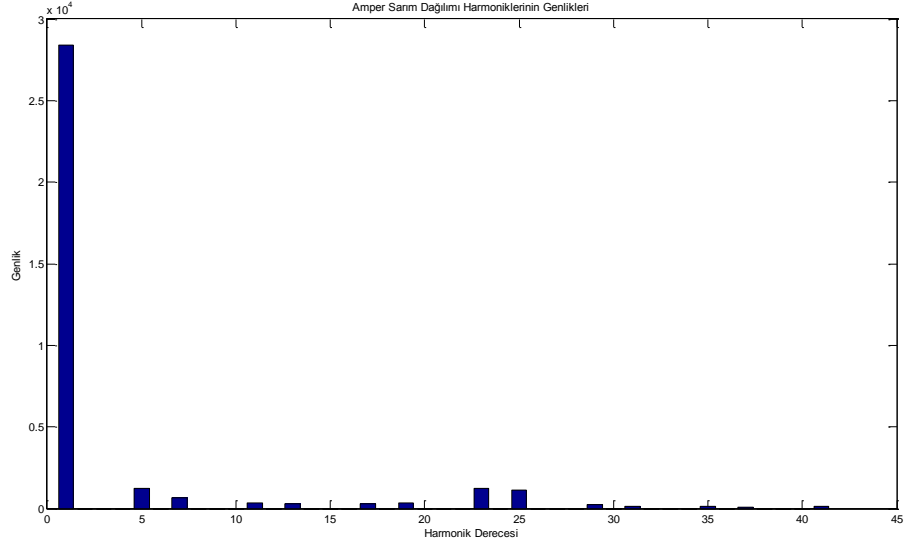
Harmonik analizinde alan dağılımı ve amper-sarım değerlerini bulunması sağlayan Fourier serisi katsayıları uyarma akısı 1 A olduğu durumda şöyle bulunmuştur.

Çizelge 4.3 : Uyarma akımı=1 A için harmonik derecelerinin Fourier serisi katsayıları

Harmonik Derecesi	Fourier Serisi Katsayısı (a_n)
1	59.1345
3	0
5	2.5358
7	1.3899
9	0
11	0.7077
13	0.5989
15	0
17	0.5723
19	0.6673
21	0
23	2.5711
25	2.3654
27	0
29	0.4372
31	0.3138
33	0
35	0.2224
37	0.2104
39	0
41	0.2373

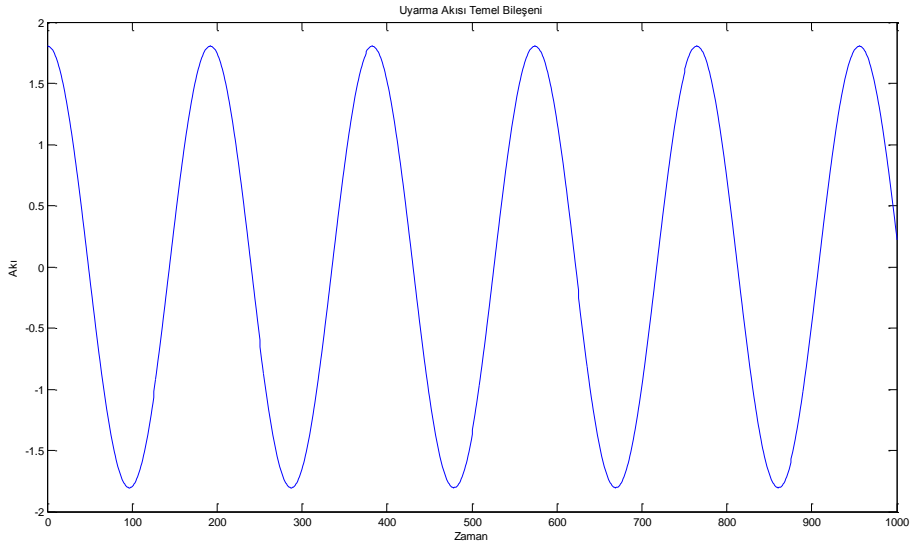
4.2.3 Klasik yöntem kullanılarak elde edilen uyarma akısı ve endüklenen gerilim harmonikleri

Hava aralığı alan fonksiyonu Fourier serisine açılarak bulunan Fourier serisi katsayıları ile uzay harmoniklerinin zamandan bağımsız genlik değerleri elde edilmiştir.

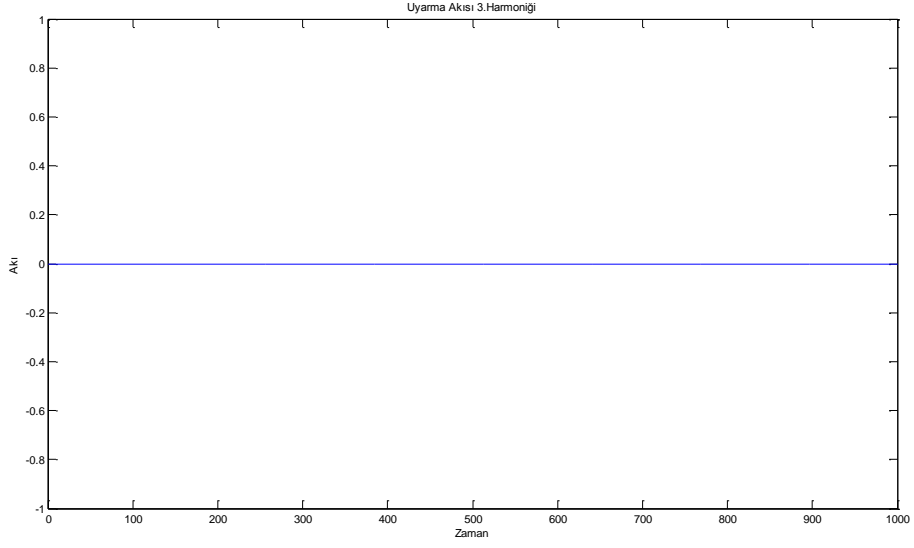


Şekil 4.1 : Amper sarım dağılımı harmoniklerinin genliği

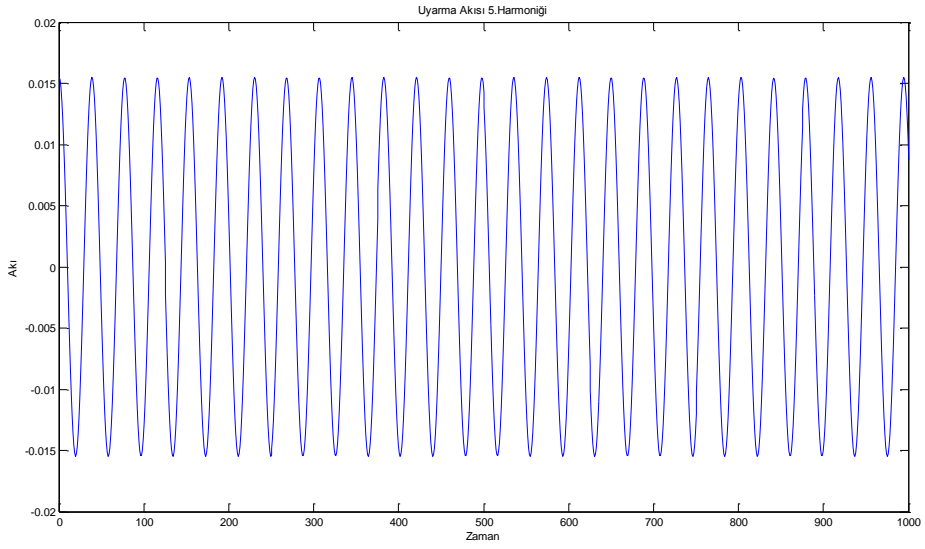
Hava aralığı amper-sarımının hesaplanmasından sonra bu değerler her bir harmonik derecesi için manyetik dirence bölünerek, harmoniklerin uyarma akıları elde edilmiştir. Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 te çeşitli harmoniklerin aki dağılımları verilmiştir. Şekil 4.6, bu harmonikleri birbirlerine göre büyüklük oranını göstermek için oluşturulmuştur.



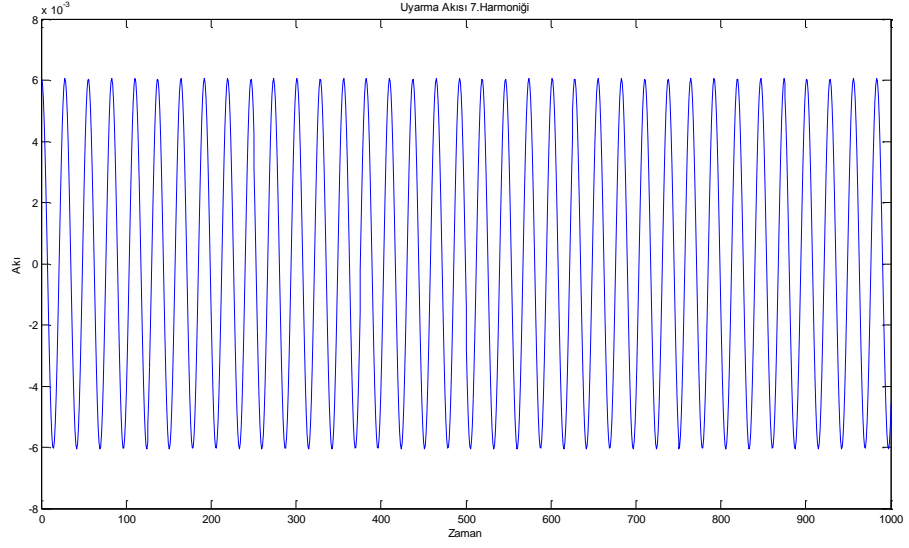
Şekil 4.2 : Uyarma akısı temel bileşeninin dağılımı



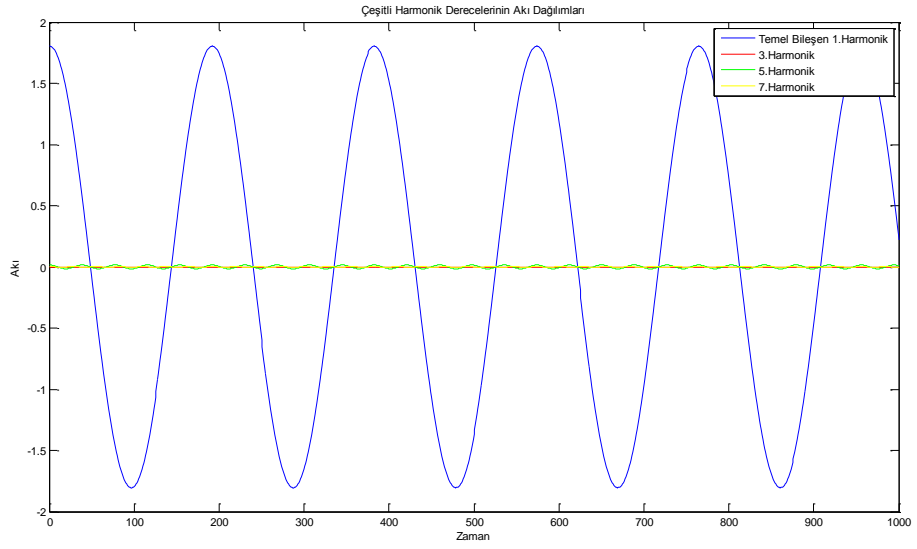
Şekil 4.3 : Uyarma akısı 3.harmoniğinin dağılımı



Şekil 4.4 : Uyarma akısı 5.harmoniğinin dağılımı

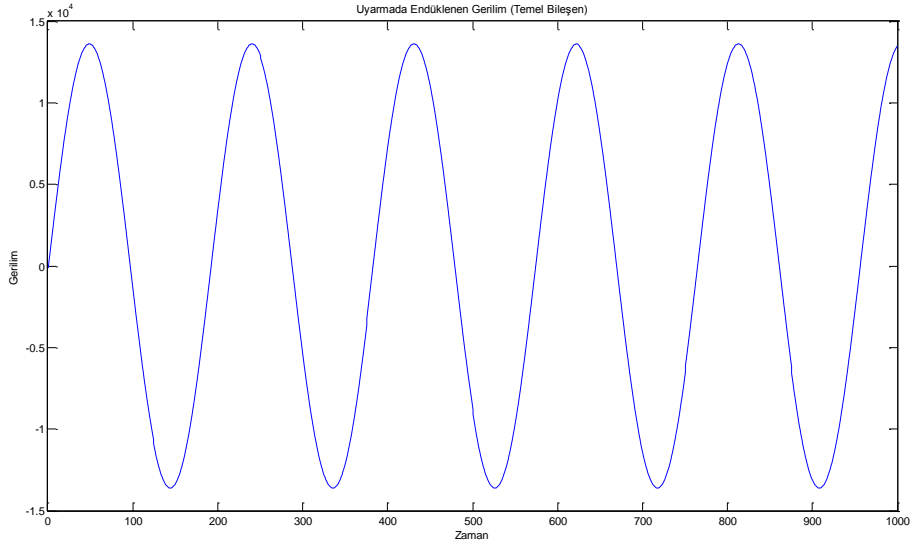


Şekil 4.5 : Uyarma akısı 7.harmoniğinin dağılımı

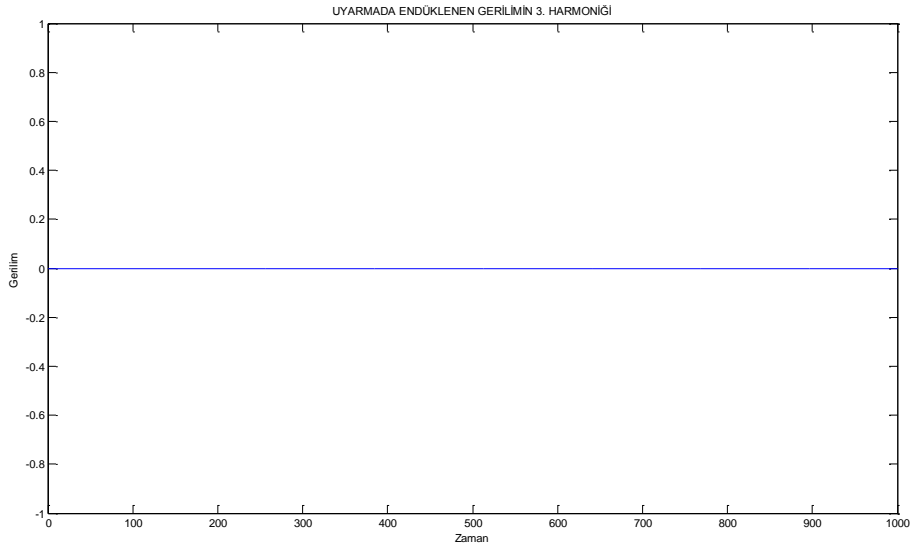


Şekil 4.6 : Uyarma akısı etkili harmoniklerinin dağılımı

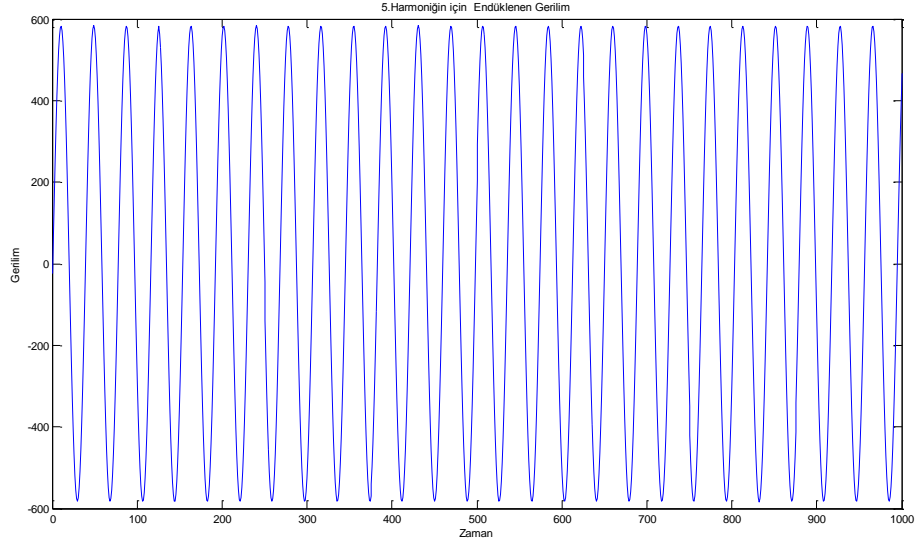
Uyarmada oluşan akı değerleri bulunduğundan sonra Denklem (4.3) yerine konularak uyarmada endüklenen gerilim elde edilir. Bu gerilimler uyarma alanında oluşan akının ilgili harmonik derecesinin endüvi sargılarında endüklediği gerilimdir.



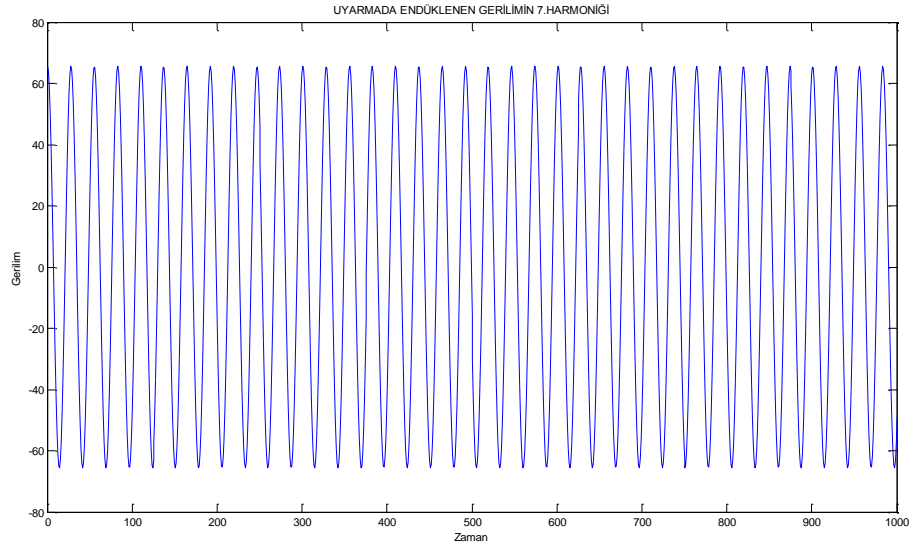
Şekil 4.7 : Uyarma alanı temel bileşenin endüvi sargılarında endüklediği gerilim



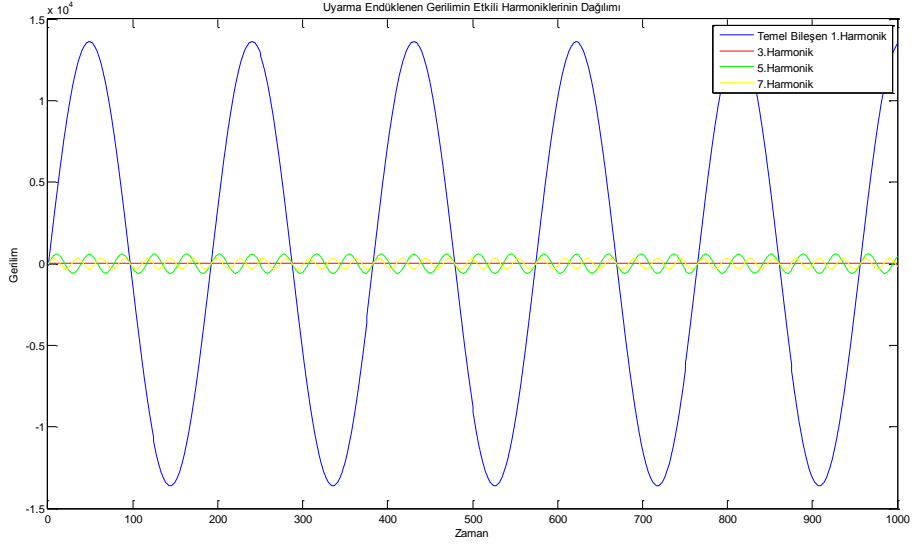
Şekil 4.8 : Uyarma alanı 3.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim



Şekil 4.9 : Uyarma alanı 5.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim



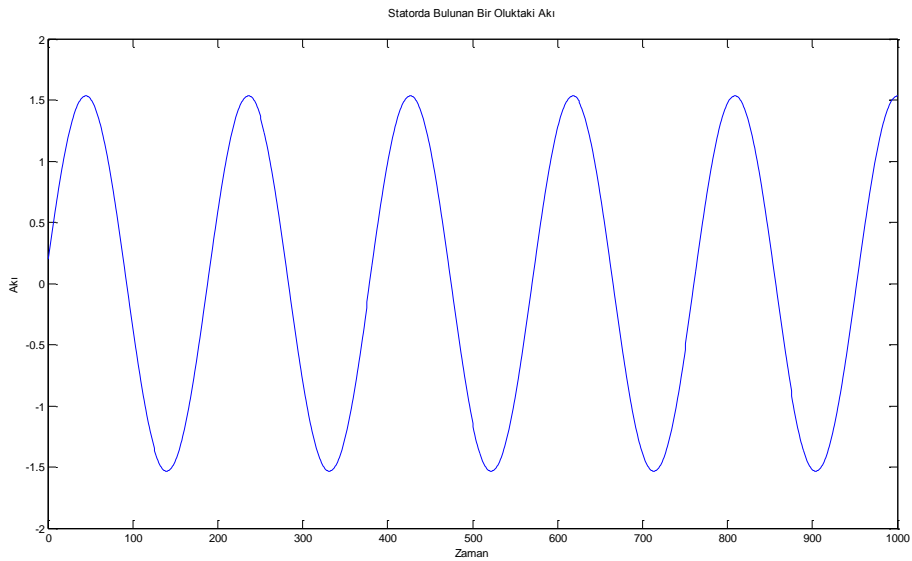
Şekil 4.10 : Uyarma alanı 7.harmoniğinin endüvi sargılarında endüklediği gerilim



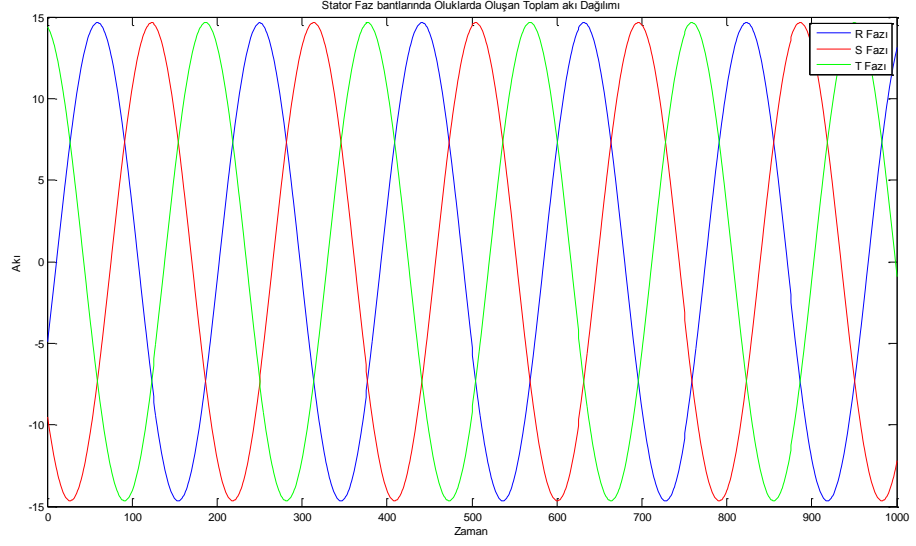
Şekil 4.11 : Uyarmada endüklene gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı

4.2.4 Uzay fazörleri oluşturularak yapılan harmonik analizi verileri

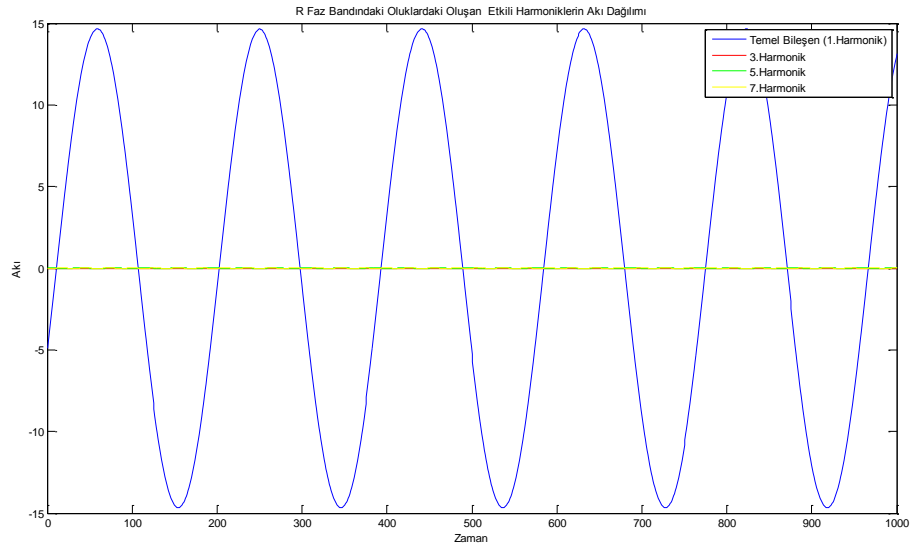
Bu bölümde, makine uzayında bulunan akı, uyarma akısı, endüklene gerilim gibi uzay dalgalarının uzay fazörü şeklinde ifade edilmesi ile oluşturan yazılım algoritmasının sağladığı harmonik analizi verileri ve makine uzayını tanımlamak için oluşturan iletken ve konum matrisleri verilmiştir.



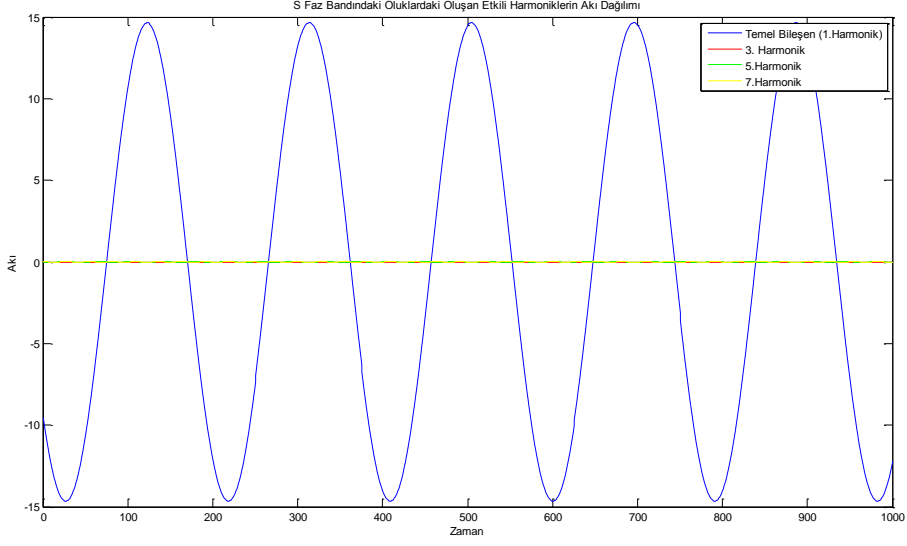
Şekil 4.12 : Statordaki bir olukta oluşun akı dağılımı



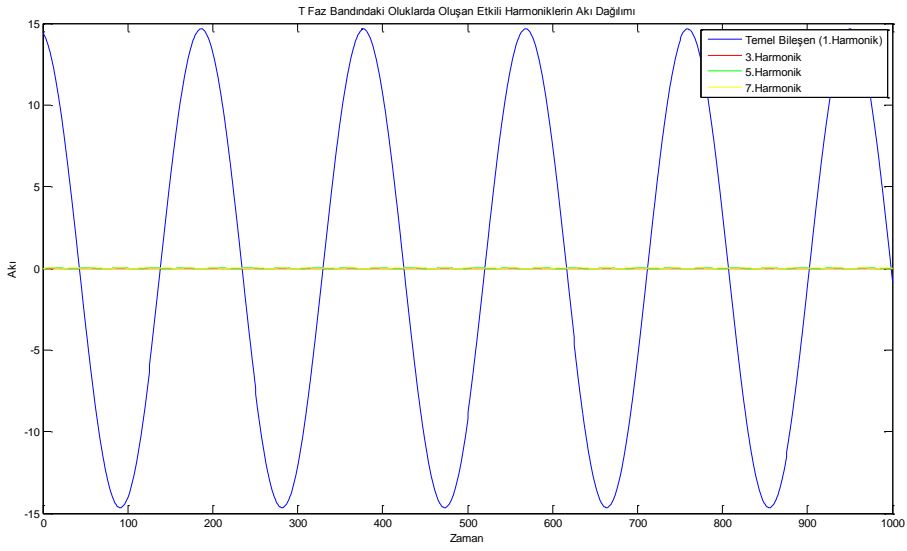
Şekil 4.13 : Stator faz bantlarında olularda oluşun toplam akı dağılımları



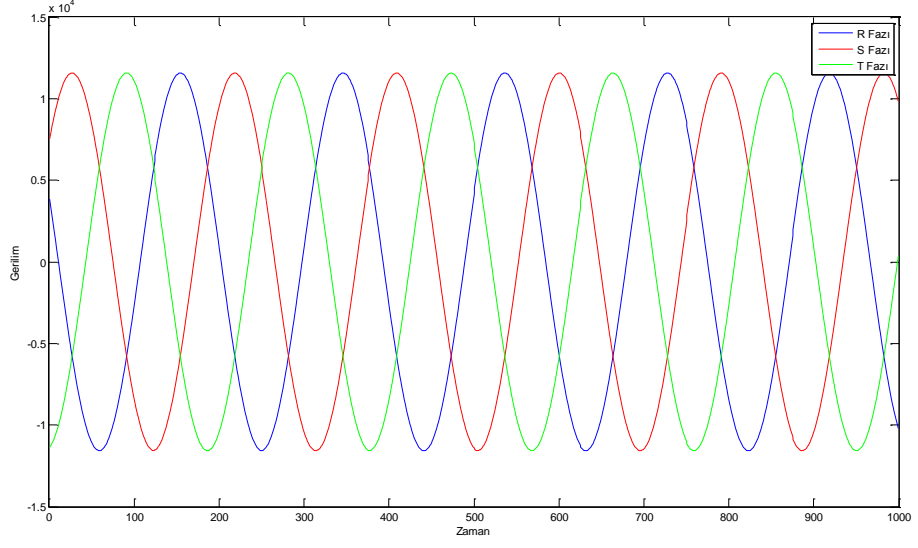
Şekil 4.14 : R faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı



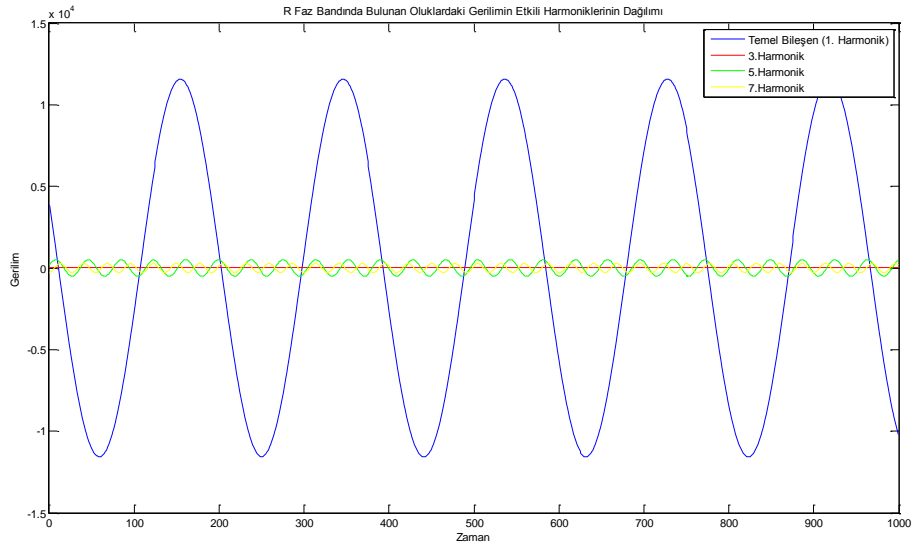
Şekil 4.15 : S faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı



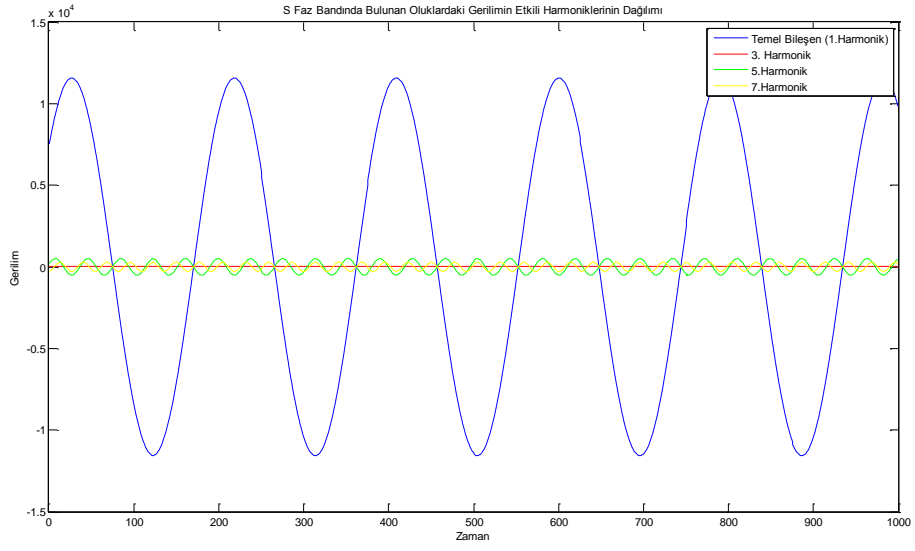
Şekil 4.16 : T faz akısının etkili harmoniklerinin dağılımı



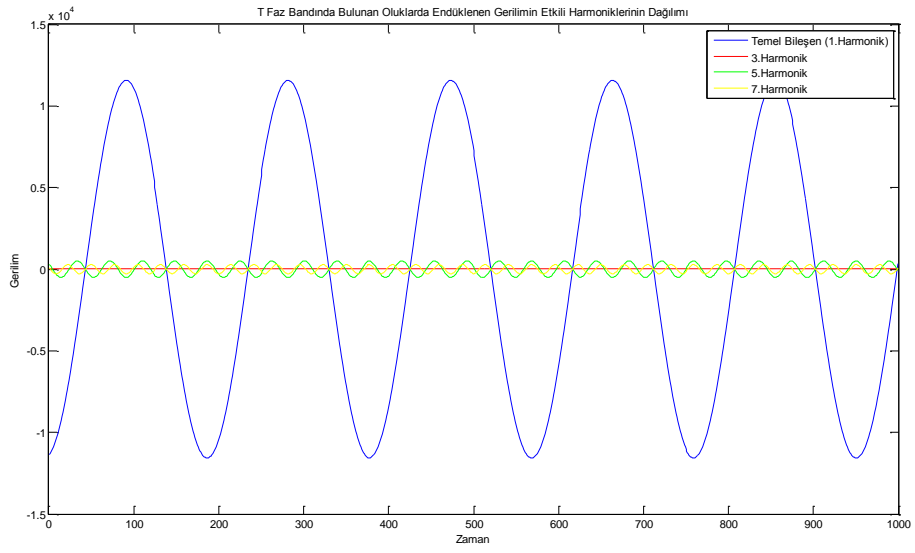
Şekil 4.17 : Faz Gerilimleri



Şekil 4.18 : R fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı



Şekil 4.19 : S fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı



Şekil 4.20 : T fazında endüklenen gerilimin etkili harmoniklerinin dağılımı

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tezde yuvarlak rotorlu senkron generatörün konstrüksiyonundan dolayı oluşan tam sinüs biçimli değişmeyen periyodik alan dağılımını oluşturan uzay dalgalarının sebep olduğu uzay harmonikleri gerek matematiksel, gerekse hesaplamalı ve uygulamalı olarak incelenmiştir.

Gerekli literatür taraması yapıldıktan sonra uzay harmoniklerinin etkilerinin incelenmesi için iki farklı metod araştırılmıştır. Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde uyarma alanının matematiksel incelenmesi için öncelikle oluklardaki amper-sarım değerleriyle ortaya çıkan basamaklı alan şeklinin harmonikleri Fourier serisine açılarak elde edilmiştir. Hazırlanan yazılım yardımı ile amper-sarım değerlerinden stator sargılarını kesen akı değerleri hesaplanmış ve buradan da süperpozisyon ilkesine dayanarak harmoniklerin tekil etkileri incelenebilecek verilere ulaşılmıştır. Uzay harmoniklerinin bu etkilerinin incelenebilmesi için bütünlük bir eşdeğer devre oluşturulmuştur.

Uyarma alan üst titreşimlerinin her birisinin makine hava aralığında bulunan uzay dalgaları olmasından yola çıkılarak her birinin bir uzay fazörü ile ifade edilebileceği gösterilmiş ve buradan yola çıkarak uzay fazörleri teorisine dayanarak uyarma alan harmoniklerinin stator sargısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu incelemede sırasında çevresel akım yoğunluğu, kompleks sargı faktörü, akı ve endüklenen gerilim büyüklükleri matrisel olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların, kalsik yöntemle yapılan inceleme ile karşılaştırıldığında bu sonuçlarla makul oranda örtüştüğü gösterilmiştir.

Sonuç olarak teze başlamadan önce hedeflenen noktaya ulaşılmış ve yuvarlak rotorlu senkron generatörde uzay harmonik etkilerinin uzay fazörü kullanılarak incelenebileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kocabaş, D. A.**, 2004: Asenkron Makinalarda Uzay Harmoniklerinin Etkilerini Azaltmaya Katkılar, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, Türkiye
- [2] **Güzelbeyoğlu, N.**, 1998: Elektrik Makinaları I, II, sayfa 86, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul
- [3] **Stepina J.**, 1995: Space-Phasor Theory? –What is that for?. *ETEP Eur. Trans on Electr. Power Engng.* Vol. 6 (1995) no. 5, pp. 409-412.
- [4] **Stepina J.**, 1968: Fundamental Equations of the Space Vector Analysis of Electrical Machines. *Acta Technica CSAV* (1968) no. 2, pp. 184-198.
- [5] **Stepina J.**, 1986: Matrix Calculation of Inductances for the General Theory of Electrical Machines, Electric Machines and Power Systems, 11:53-63, Hemisphere Publishing Corporation
- [6] **Kovacs, K. P.**, 1959: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften. Budapest/Hungary.
- [7] **Serrano-Iribarnegaray, L.**, 1993: The Modern Space-Phasor Theory, Part I: Its Coherent Formulation and its Advantages for Transient Analysis of Converter-Fed AC Machines. *ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Engng.* Vol. 3 (1993) no. 2, pp. 171-180.
- [8] **Serrano-Iribarnegaray, L.**, 1993: The Modern Space-Phasor Theory, Part II: Its Comparison with Generalized Machine Theory and the Space-Vector Theory. *ETEP Eur. Trans on Electr. Power Engng.* Vol. 3 (1993) no. 3, pp. 213-219.
- [9] **Serrano-Iribarnegaray, L.**, 1995: Critical Review of the Scientific Background Underlying the Generalized Machine Theory and Correlation Theorems in the Space-Phasor Theory. *ETEP Eur. Trans on Electr. Power Engng.* Vol. 5 (1993) no. 4, pp. 247-255.
- [10] **Kocabaş, D. A.**, 1997: Elektrik Makinalarında Uzay Harmoniklerinin Uzay Fazörleri ile Bilgisayar Destekli Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, Türkiye
- [11] **Cathey, Jimmie J.** 2001: Electric machines: Analysis and Design Applying MATLAB, Mc Graw Hill, Singapore

EKLER

EK A.1: MATLAB yazılımı

```
%Girilecek rotor büyüklükler;
Qrr=24;
Qs=60;
alf=[7.5 22.5 37.5 52.5 ] ;
tet=[14 28 42 56 ];
H= 41;
Na=20;

%işletme büyüklükleri
V1=380/sqrt(3);
La=2.75692e-3;
Lsgm=1.8395765e-4;
Ra=2.88e-3;
Ry=0.9216;
Ly=1.833465e-3;
f=60;
T=1000;
uyarakim=480;

%Uzay Fazörlü hesap için
LFe=3.28;
D=1.12;
mu=4*pi*10^(-7);
LM0=0.127;

Dort=D+LM0;
ha=Lfe/D;

%Rotor
Qr=Qrr/3;
p=1;
q=Qrr/2/3;
qf=(Qrr/(2*p))*(2/3);
Nf=2*max(tet);
%Stator
qa=Qs/(2*p*3);
Noluk=Na/qa;

for n=1:H ;
    rme(n)=(LM0)/(mu*1*(pi*Dort/(2*p*n))*LFe); %Manyetik direnç
    matrisi
end

%Oluk konumlari ve ampersarım;
for s=1:q;
    al(s)=180-alf(q+1-s);
end;
alfe=[alf al]+180;
```



```

alfa=[alf al alfe]*pi/180;

for s=1:q-1
    te(s)=tet(q-s);
end;
te(q)=0;
teta=[[tet te] ([tet te]*-1)];

%Alan fonksiyonu
bas(1:2:8*q-1)=alfa(1:4*q)*180/pi;
bas(2:2:8*q)=alfa(1:4*q)*180/pi;
gen(2:2:8*q-2)=teta(1:4*q-1);
gen(3:2:8*q-1)=teta(1:4*q-1);
gen(8*q)=0;

for n=1:H;
    for s=1:(2*q-1);
        ann(s+1)=teta(s)*(cos(n*alfa(s))-cos(n*alfa(s+1)));
        ann(s+1)=ann(s+1)+ann(s);
        annn(s+1)=teta(s+Qr)*(cos(n*alfa(s+Qr))-
cos(n*alfa(s+Qr+1)));
        annn(s+1)=annn(s+1)+annn(s);
        bnn(s+1)=teta(s)*(-sin(n*alfa(s))+sin(n*alfa(s+1)));
        bnn(s+1)=bnn(s+1)+bnn(s);
        bnnn(s+1)=teta(s+Qr)*(-
sin(n*alfa(s+Qr))+sin(n*alfa(s+Qr+1)));
        bnnn(s+1)=bnnn(s+1)+bnnn(s);
    end;

    an(n)=1/(n*pi)*(ann(s+1)+annn(s+1));
    bn(n)=1/(n*pi)*(bnn(s+1)+bnnn(s+1));

    if abs(an(n))<1e-3;
        an(n)=0;
    end;

    if abs(bn(n))<1e-3;
        bn(n)=0;
    end;
end;

% rotor sargi faktoru
Gelr=360/Qrr*p; %Rotor elektriksel açısı
for n=1:2:H;
kwn(n)= sin(n*qf*Gelr/2*pi/180)/(qf*sin(Gelr/2*n*pi/180));
if abs(kwn(n))<1e-3;
    kwn(n)=0;
end
rsf(n,1)=abs(kwn(n));
end

%stator sargı faktoru
Gels=360/Qs*p; %Stator elektriksel açısı
for n=1:2:H;

```

```

kwa(n)= sin(n*qa*Gels/2*pi/180)/(qa*sin(Gels/2*n*pi/180));
if abs(kwa(n))<1e-3;
    kwa(n)=0;
end
ssf(n,1)=abs(kwa(n));
end

%Harmoniklerin amper sarim genlikleri
%uyarma akimi If
for n=1:H;
Fgen(n)=abs (an(n))* uyarakim;

end

ns=3000; %senkron hız
ws=2*pi*ns/60; %acisal hiz

% Harmoniklerin amper sarim degerleri ( Famp(n) )
% uyarma aki degeri ( aki (n) )
% Uyarmada enduklenen gerilim ( ef(n) )
for n=1:H;
    wn(n)=ws*n ; % harmonik dalgasinin acisal hizi
    Xy(n)=2*pi*f*n*Ly;
    Xa(n)=2*pi*f*n*La;
    Xsgm(n)=2*pi*f*n*Lsgm;
    Zn(n)=i*Xa(n)+i*Xsgm(n)+i*Xy(n)+Ra+Ry;

    for t=1:T

        Famp(n,t)=(Fgen(n))* cos(2*pi*f*n*(t-1)*0.005*pi/180);
        aki(n,t)=(Famp(n,t)/rme(n));

    end
end

for n=1:H;
    for t=1:T;
        for a=1:Qs;
            aci=(2*pi/Qs)*n*p;

Ef(n,a,t)=Noluk*(Fgen(n)/rme(n))*2*pi*f*n*sin((2*pi*f*n*(t-1)*0.005
- (aci*(a-1)))*pi/180);
        end
    end
end

Efrrr(1:H,1:qa,1:T)=Ef(1:H,1:qa,1:T);
Efsss(1:H,1:qa,1:T)=Ef(1:H,2*qa+1:3*qa,1:T);
Efddd(1:H,1:qa,1:T)=Ef(1:H,4*qa+1:5*qa,1:T);

Efrr=sum(Efrrr,2);
Efss=sum(Efsss,2);
Efdd=sum(Efddd,2);

```

```

for n=1:H,
    for t=1:T
        Efr(n,t)=Efrr(n,1,t);
        Efs(n,t)= Efss(n,1,t);
        Eft(n,t) = Eftt(n,1,t);
    end;
end;

%UZAY FAZÖRÜ MODELİ

%Rotor Büyüklükleri
for a=1:Qrr;
tetar(a)= (a-1)*2*pi/Qrr;
end

Nolukf=tet(qf/2)*2;

%iletken dağılım matrisi

    for b=1:qf;
        zrt(b+q/2,1)=Nolukf;
        zrt(b+qf+3*q/2,1)=-Nolukf;
    end
        zrt(2*qf+3*q/2+1:2*qf+4*q/2,1)=0;

%kompleks oluk konumları
for n=1:H;
    for a=1:Qrr;
        rrt(n,a)=exp(i*n*tetar(a));
    end
end

%kompleks etkin iletken sayısı
Srt=rrt*zrt;

    for b=1:Qrr;
        ztt(b+1)=abs(zrt(b));
        ztt(b+1)=ztt(b+1)+ztt(b);
    end;

ztopr=ztt(Qrr+1);

%kompleks sargı faktoru

    for n=1:H;
        kkwn(n,1)=Srt(n,1)/ztopr;
        if abs(kkwn(n,1))<1e-3;
            kkwn(n,1)=0;
        end;
    end;

%Uyarma akimi uzay fazörü
for b=1:qf;

```

```

        Irf(b+q/2,1)=uyarakim;
        Irf(b+qf+3*q/2,1)=-uyarakim;
end
        Irf(2*qf+3*q/2+1:2*qf+4*q/2,1)=0;

Infr=rrt*Irf;

%İndirgeme açısı ve Uyarma akimi uzay fazörünün statora indirgenmiş
hali
for n=1:H;
    for t=1:T;
        tetaind(n,t)=n*2*pi*f*(t-1) *0.005;
        Infrs(n,t)=Nolukf*Infr(n)*exp(-j*tetaind(n,t)*pi/180);
    end;
end;

% stator olukları konum matrisi (radyan)

for a=1:Qs;
    tetas(a)= (a-1)*2*pi/Qs;
end

%iletken dağılım matrisi

for b=1:qa;
    zst(b,1)=Na/qa;
    zst(b+qa,3)=-Na/qa;
    zst(b+2*qa,2)=Na/qa;
    zst(b+3*qa,1)=-Na/qa;
    zst(b+4*qa,3)=Na/qa;
    zst(b+5*qa,2)=-Na/qa;
end

%kompleks oluk konumları
for n=1:H;
    for a=1:Qs;
        rst(n,a)=exp(i*n*tetas(a));
    end
end

%kompleks etkin iletken sayısı
Sst=rst*zst;

for a=1:3;
    for b=1:Qs;
        zt(b+1,a)=abs(zst(b,a));
        zt(b+1,a)=zt(b+1,a)+zt(b,a);
    end;
end;

ztop(1,1:3)=zt(Qs+1,1:3);

%kompleks sargı faktörü

```

```

for a=1:3;
    for n=1:H;
        kkwa(n,a)=Sst(n,a)/ztop(1,a);
        if abs(kkwa(n,a))<1e-3;
            kkwa(n,a)=0;
        end;
    end;
end;

%aki hesabı
for n=1:H;
    for t=1:T;
        for a=1:Qs;

akioluk(n,a,t)=(((LFe*D*mu*ha)))/((2*pi))*(1/(n^2))*real(Infrs(n,t)*
exp(j*n*tetas(1,a)));
            end;
        end
    end

%Toplam aki
akitopr(1:H,1:qa,1:T)=akioluk(1:H,1:qa,1:T);
akitops(1:H,1:qa,1:T)=akioluk(1:H,2*qa+1:3*qa,1:T);
akitopt(1:H,1:qa,1:T)=akioluk(1:H,4*qa+1:5*qa,1:T);

akitopr=sum(akitopr,2);
akitops=sum(akitops,2);
akitopt=sum(akitopt,2);

for n=1:H
    for t=1:T
        akitopr(n,t)=akitopr(n,1,t);
        akitops(n,t)=akitops(n,1,t);
        akitopt(n,t)=akitopt(n,1,t);
    end;
end;

for n=1:H
    for t=1:T
        akiloluk(n,t)=akioluk(n,1,t);
    end
end

%enduklenen gerilim hesabı
for n=1:H;
    for t=1:T-1;
        for a=1:Qs;
            gerfaz(n,a,t)=-
Noluk*((LFe*D*mu*ha))*f*real(Infrs(n,t)*exp(j*n*tetas(1,a)));
        end;
    end
end

gerfazrr(1:H,1:qa,1:T-1)=gerfaz(1:H,1:qa,1:T-1);
gerfazsss(1:H,1:qa,1:T-1)=gerfaz(1:H,2*qa+1:3*qa,1:T-1);
gerfazttt(1:H,1:qa,1:T-1)=gerfaz(1:H,4*qa+1:5*qa,1:T-1);

gerfazrr=sum(gerfazrr,2);
gerfazsss=sum(gerfazsss,2);

```

```
gerfaztt=sum(gerfazttt,2);

for n=1:H,
    for t=1:T-1
        gerfazr(n,t)=gerfazrr(n,1,t);
        gerfazs(n,t)= gerfazss(n,1,t);
        gerfazt(n,t) = gerfaztt(n,1,t);
    end;
end;
```


ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hüseyin DENİZ

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL 16.01.1987

Adres: Mimar Sinan Mah. Nuro! Çekmeköy Konakları NO:20

Çekmeköy / İstanbul

Lisans Üniversitesi: Bilkent Üniversitesi 2008