

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON GENERATÖRÜN GEÇİCİ
VE SÜREKLİ DURUM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

116648

Sencer ÜNAL

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELAZIĞ
2002**

116648

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON GENERATÖRÜN GEÇİCİ VE
SÜREKLİ DURUM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

Sencer ÜNAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu Tez,14.08.2002..... Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği / Oyçokluğu İle Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

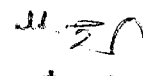

(İmza)

Danışman

Doç.Dr. Yakup DEMİR


(İmza)

Doç.Dr. Hanifi GÜLDEMİR


(İmza)

Doç.Dr. Mustafa C. CEMAL

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun//
tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON GENERATÖRÜN GEÇİCİ VE SÜREKLİ DURUM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Sencer ÜNAL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

2002-Sayfa: 73

Teknolojide meydana gelen gelişmelerden dolayı insanların enerjiye olan ihtiyacı günden güne artmaktadır. Bununla birlikte dünyada halen kullanılmakta olan enerji kaynaklarının sınırlı olması yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının zamanla değişken bir yapıya sahip olmaları bu kaynaklardan enerji üretiminde kullanılacak olan elemanın da değişik hızlarda elektrik enerjisi üretebilecek bir özelliğe sahip olmasını gerektirmektedir.

Bu tür uygulamalarda asenkron makinanın, özellikle sincap kafes tipindeki asenkron makinanın generatör olarak kullanılması senkron generatöre göre daha popüler hale gelmektedir. Çünkü, asenkron generatörler sabit hızda olduğu gibi değişik hızlarda da güç dönüşümü yapabilmektedir. Ayrıca bazı özellikleri ile senkron generatörlerden daha kullanışlıdır.

Bu çalışmada kendinden uyarımlı asenkron generatörün dinamik davranışının incelenmesi için bir model geliştirilmiştir. Bu model sayesinde elde edilen teorik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING OF STEADY AND TRANSIENT STATE BEHAVIOUR OF SELF- EXCITED ASYNCHRONOUS GENERATOR

Sencer ÜNAL

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

2002-Page: 73

The energy demand has been increasing day by day due to technological developments. However the energy sources over the world are limited and this increases the importance of renewable energy sources.

Since the renewable energy sources have time-dependent regimes, the machines used in production of energy from these sources should have the ability of producing energy in various speeds.

The use of squirrel cage asynchronous machines has been much more popular as generators compared with synchronous generators. Because asynchronous generators can transform power at variable speeds besides constant speeds. In addition they are more useful with regard to some characteristics.

In this study a new model was developed in order to investigate the dynamic behaviours of a self-excited asynchronous generator. The theoretical results obtained using the model were compared to the experimental ones.

TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışmanın yönlendirilmesi ve tamamlanmasında her türlü desteği sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yakup DEMİR' e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR' e teşekkür ederim.

Çalışma öncesinde ve çalışma süresince büyük yardımlarını gördüğüm Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN' a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen bölümdeki hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak da benden desteklerini esirgemeyen eşim ve tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
SİMGELER LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. ASENKRON GENERATÖRLER.....	4
2.1 Asenkron Generatörlerin Uyarım Türleri.....	4
2.1.1 Asenkron Generatörlerin Şebeke ile Paralel Olarak Çalıştırılması.....	4
2.1.2 Asenkron Generatörün Lokal Olarak Çalıştırılması.....	5
2.2 Asenkron Generatörlerde Karşılaşılan Sorunlar.....	8
2.3 Asenkron Generatörler ile Senkron Generatörlerin Kıyaslanması.....	11
3. ASENKRON GENERATÖRÜN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ.....	15
3.1 Giriş.....	15
3.2 Bilezikli Asenkron Makina Denklemlerinin Faz Değişkenleri ile Yazılması.....	15
4. ASENKRON GENERATÖRÜN PSPICE MODELİNİN ELDE EDİLMESİ.....	21
4.1 Giriş.....	22
4.1.1 Zaman Domeni Matematiksel Modeli.....	22
4.1.2 Elektriksel Devre Tanımlanmaları.....	22
4.1.3 Endüklenen Gerilim Tanımlanmaları.....	23

4.1.4 Ani Moment İfadesi ve Elektromekanik Tanımlamalar.....	24
4.2 Teorik ve Deneysel Sonuçlar.....	28
4.2.1 Generatörün Kendi Kendini Uyartım Süresince Ürettiği Gerilimin Değişimi.....	29
4.2.2 Uyartım Kondansatörlerinin Değerlerinin Değiştirilmesi Durumunda Generatör Geriliminin Değişimi.....	32
4.2.3 Tahrik Hızının Değiştirilmesi Durumunda Generatör Gerilimindeki Değişimler.....	35
4.2.4 Asenkron Generatörün Uçlarına Yük İlave Edildiğinde Generatör Gerilimindeki Değişimler.....	38
4.3 Değerlendirme.....	48
5. UYARTIM İÇİN GEREKLİ MİNİMUM KONDANSATÖR DEĞERİNİN HESAPLANMASI.....	49
5.1 Giriş.....	49
6. UYARTIM KONDANSATÖRÜNÜN ANAHTARLANMASI.....	60
6.1 Giriş.....	60
6.2 PSPICE Modeli ve Teorik Sonuçlar.....	61
7. SONUÇLAR.....	68
KAYNAKLAR.....	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Şebeke ile paralel çalışan bir asenkron generatörün bağlantısı.....	4
Şekil 2.2	Asenkron makinanın moment-kayma karakteristiği.....	5
Şekil 2.3	Lokal olarak çalışan bir asenkron generatörün bağlantı şeması.....	6
Şekil 2.4	Basitleştirilmiş ve yüksüz durumda kondansatör ile asenkron generatörün kendinden uyarım devresi ve fazör diyagramı.....	7
Şekil 2.5	Asenkron makinanın boşa çalışma karakteristiği ve $V_c = \frac{I}{C\omega}$ eğrileri.....	8
Şekil 2.6	Kondansatör ile kendinden uyarım için çalışma noktaları.....	9
Şekil 2.7	Asenkron makinanın boşa çalışma karakteristiği ve $V_c = \frac{I}{C\omega}$ eğrileri.....	10
Şekil 3.1	Üç fazlı $2p=2$ kutuplu bilezikli asenkron makinanın gösterimi.....	16
Şekil 4.1	Stator veya rotor bir fazına ait tam eşdeğer devre.....	23
Şekil 4.2	Türev devresi.....	24
Şekil 4.3	İntegral devresi.....	26
Şekil 4.4	Asenkron generatörün direk faz tam eşdeğeri (stator eşdeğeri).....	26
Şekil 4.5	Asenkron generatörün direk faz tam eşdeğeri (rotor eşdeğeri).....	27
Şekil 4.6	Stator akımlarının türevlerini alan devreler.....	27
Şekil 4.7	Rotor akımlarının türevlerini alan devreler.....	27
Şekil 4.8	Elektromekanik tanımlamaları gerçekleyen devreler.....	28
Şekil 4.9	154 μF ' lık uyarım kondansatörü için generatörün kendi kendini uyarım süresince uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	30
Şekil 4.10	154 μF ' lık uyarım kondansatörü için generatörün kendi kendini uyarım süresince uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	31
Şekil 4.11	120 μF ' lık uyarım kondansatörünün 154 μF ' a çıkarılması durumunda generatörün geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	33

Şekil 4.12	154 μF ' lık uyartım kondansatörünün 120 μF ' a indirilmesi durumunda generatörün geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	34
Şekil 4.13	Tahrik hızının 1318 dev/dk' dan 1190 dev/dk' ya düşmesi durumda 137 μF ' lık uyartım kondansatörü için uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	36
Şekil 4.14	Tahrik hızının 1190 dev/dk' dan 1354 dev/dk' ya yükselmesi durumunda 137 μF ' lık uyartım kondansatörü için uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	37
Şekil 4.15	154 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 30 Ω ' luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	40
Şekil 4.16	154 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip ve uçlarında 30 Ω ' luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	41
Şekil 4.17	154 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 75 Ω ' luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	42
Şekil 4.18	154 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip ve uçlarında 75 Ω ' luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	43
Şekil 4.19	171 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 30 Ω ' luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	44
Şekil 4.20	171 μF ' lık uyartım kondansatörüne sahip ve uçlarında 30 Ω ' luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	45

Şekil 4.21	171 μF ' luk uyarım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 75 Ω ' luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	46
Şekil 4.22	171 μF ' luk uyarım kondansatörüne sahip ve uçlarında 75 Ω ' luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi a) Deney sonucu b) Benzetim programı sonucu.....	47
Şekil 5.1	Kendinden uyarımlı asenkron generatörün bir faz için eşdeğer devresi.....	49
Şekil 5.2	Asenkron generatörün bir faz için eşdeğer devresi.....	50
Şekil 5.3	Basitleştirilmiş eşdeğer devre.....	52
Şekil 5.4	Kondansatör değeri-Hız eğrisinin değişimi.....	59
Şekil 5.5	Kapasite değeri-Frekans değeri değişimi.....	59
Şekil 6.1	Asenkron generatörün uç geriliminin kontrolü için gerçekleştirilecek devrenin blok diyagramı.....	61
Şekil 6.2	Uyarım kondansatörünün anahtarlama durumunda asenkron generatörün stator eşdeğeri.....	62
Şekil 6.3	Çift yönlü anahtarların kontrol işaretlerini üreten devre.....	63
Şekil 6.4	96 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyarım kondansatörünün değeri $C=154\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=364\mu\text{F}$).....	64
Şekil 6.5	70 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyarım kondansatörünün değeri $C=154\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=278\mu\text{F}$).....	64
Şekil 6.6	85 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyarım kondansatörünün değeri $C=171\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=358\mu\text{F}$).....	65
Şekil 6.7	66 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyarım kondansatörünün değeri $C=171\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=275\mu\text{F}$).....	65

- Şekil 6.8 Tahrik hızının 1380 dev/dk' dan 1280 dev/dk' ya düşmesi durumunda, 102 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30 Ω ' luk omik yük için generatör geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu F$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=372\mu F$).....66
- Şekil 6.9 Tahrik hızının 1380 dev/dk'dan 1280 dev/dk' ya düşmesi durumunda, 74 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu F$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=284\mu F$).....66



SİMGELER LİSTESİ

V	: gerilim
I	: akım
R	: direnç
L	: indüktans
L_{Rs}, L_{Rr}	: her faz için stator/rotor sargısı kaçak indüktansı
L_{sr}, L_{rs}	: stator ile rotor arasındaki ortak indüktansların tepe değeri
L_{ss}, L_{rr}	: stator/rotor sargısının self (öz) indüktansı
L_{sm}, L_{rm}	: stator/rotor sargıları arasındaki ortak indüktans
ψ	: akı
M_m	: elektriksel moment
M_y	: yük moment
J	: eylemsizlik katsayısı
s	: stator
r	: rotor
a, b, c	: faz büyüklükleri
ω	: açısal hız
p	: kutup çifti
θ	: rotor açısı
Z	: Empedans
ω_r	: rotor hızı, elektriksel rad/sn
a	: generatör frekansı/ değer biçilen frekans
X_1, X_2	: faz başına stator ve rotor kaçak reaktansı , değer belirtilen frekansa göre statora indirgenmiş değerler, Ω
X_m	: faz başına magnetik reaktans, Ω
R_1, R_2	: statora indirgenmiş faz başına stator ve rotor rezistansı, Ω
C	: faz başına terminal kendinden uyartım kapasitesi, F
f_s	: generatör frekansı, Hz
f	: belirlenen frekans, 50 Hz
b	: rotor hızı, Per- unit
E_1	: hava aralığı geriliminin efektif değeri, V

XIII

$C_{\min}$	: faz başına kendinden uyartım kapasitesinin min değeri, F
X_C	: faz başına kapasitif reaktans, Ω
R_L	: faz başına yük direnci, Ω
V_1	: faz başına çıkış terminal geriliminin efektif değeri, V



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve hızla artan nüfus, enerjiye duyulan ihtiyacı gün geçtikçe arttırmaktadır. Bununla birlikte; dünyada halen kullanılmakta olan petrol ve kömür gibi enerji kaynaklarının sınırlı olması, artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere değişik yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda; rüzgar, küçük debili akarsular ve doğal gazlar hem ulusal elektrik şebekesine hem de ulusal elektrik şebekesinin ulaşamadığı bağımsız yüklere enerji sağlamak için kullanılabilecek seçenekler olarak görülmektedir (Elder ve diğ., 1983; Singh, 1995).

Özellikle ulusal elektrik şebekesinin olmadığı uzak yerleşim bölgeleri ile mikrodalga tekrarlayıcı istasyonları, yangın gözetleme kuleleri, petrol boru hatlarının katodik koruma sistemleri, deniz fenerleri, deniz ve dağ evleri gibi münferit yüklerin elektrik enerjisi gereksinimleri alışılmış kaynaklara dayalı bağımsız güç kaynaklarınca karşılanmaktadır. Bu kaynaklardan sıvı fosil yakıt tüketen motor-generatör grupları yaygın bir kullanım kazanmışlardır. Genellikle birkaç kVA gücünde olan bu kaynaklardan sağlanan birim elektrik enerjisi yüksek bir maliyetle üretilmektedir. Çünkü; yakıt fiyatları, yakıtın nakil giderleri, sistemin çalışma düzeni nedeniyle yıllık bakım-onarım maliyetinin ilk yatırım maliyetine yaklaşması gibi nedenlerle maliyet artmaktadır. 1973 yılından itibaren alışılmamış kaynak teknolojilerindeki gelişmeler ve petrol fiyatlarındaki artışlar sonucu günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı (güneş, rüzgar gibi) bağımsız sistemler üretilmektedir. Bu sistemlerde kullanılan enerji kaynakları yenilenebilir olmasına rağmen, zamanla değişken bir yapıda oldukları için, bu enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesinde kullanılacak elemanın değişik hızlarda elektrik enerjisi üretebilecek bir özelliğe sahip olması gerekmektedir (Demirekler ve Üçtuğ, 1985; Ertan ve diğ., 1985; Büyükçınar ve Ermiş, 1985). Bu tür uygulamalarda asenkron makinanın, özellikle sincap kafes tipindeki asenkron makinanın generatör olarak kullanılması senkron generatöre göre daha popüler hale gelmektedir. Çünkü, asenkron generatörler sabit hızda olduğu gibi değişik hızlarda da güç dönüşümü yapabilmektedir ve bazı özellikleri ile senkron generatörlerden daha kullanışlıdır. Ayrıca asenkron makinelerin düşük maliyetleri, bakım kolaylıkları ve fırça-kollektör içermemesi gibi özellikleri de bu amaçla kullanımında ayrı bir tercih

nedeni olmaktadır. Bunun yanında asenkron generatörlerin şebekeye paralel bağlanma yani senkronizasyon problemi olmaması da ayrı bir üstünlük olarak görülebilir. Bütün bu nedenlerden dolayı, son yıllarda asenkron generatörler üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar hız ve yoğunluk kazanmıştır (Fidan, 1996; Elder ve diğ., 1983; Singh ve diğ., 1995; Murthy ve diğ., 1982).

Asenkron makina, senkron devir sayısı üzerinde bir hızda döndürülürse ve kendini uyarması için gerekli olan mıknatıslanma akımı temin edilirse, generatör olarak çalışmaya başlar. Generatör çalışmada güç kaynağı rotordan alınan mekanik güç olduğu için mıknatıslanma akımı ancak elektriksel uçlardan (stator) sağlanabilir. Bu nedenle asenkron makinanın generatör olarak çalışması için stator sargı uçlarına ya endüktif akım sağlayacak ya da kapasitif akım alabilecek bir sistem bağlamak gerekir (Sarioğlu, 1983). Asenkron makinanın mıknatıslanma akımını sağlayacak yöntemler ikinci bölümde incelenecektir.

Bu tezde, üç fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün gerilim üretebilmesi için ihtiyaç duyulan minimum kondansatör değerinin hesaplanması için bir çözüm yönteminin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, lokal olarak çalışan asenkron generatörün geçici ve sürekli durum davranışının incelenmesi için bir model geliştirmek ve bu modelden elde edilen teorik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırarak, asenkron generatörün sürekli ve dinamik durum özelliklerini incelemektir.

Tezde, asenkron generatörün üretmiş olduğu gerilimin yüke bağlı olarak değişimi karşısında, uyarım için bağlanan kondansatörlerin kapasite değerlerinin ayarlanması ile gerilimdeki bu değişimi engelleyebilecek bir modelin geliştirilmesi de amaçlanmıştır.

Tezin alt bölümlerine ilişkin şu açıklamalar yapılabilir:

İkinci bölümde asenkron generatörlerin genel özellikleri verilmiştir. Üçüncü bölümde, asenkron generatörün matematiksel modeli elde edilmiştir. Dördüncü bölümde, asenkron generatörün çıkarılan matematiksel modeline göre PSPICE modeli kurulmuştur ve PSPICE modelinden elde edilen sonuçlarla, deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yine bu bölümde kondansatör değerinin kontrolü ile generatörün üretmiş olduğu gerilimin yüke bağlı olarak değişimini engelleyecek bir model elde edilmiştir. Beşinci bölümde, asenkron generatörün gerilim üretebilmesi için gerekli olan

hesaplanması için bir çözüm yöntemi elde edilmiştir. Altıncı bölümde, generatörün uyartım kondansatörünün kontrolü ile uç geriliminde meydana gelebilecek değişimleri engelleyebilecek bir model sunulmuştur. Son bölümde ise, tezle ilgili sonuçlar özet olarak verilmiştir.



2. ASENKRON GENERATÖRLER

2.1 Asenkron Generatörlerin Uyarım Türleri

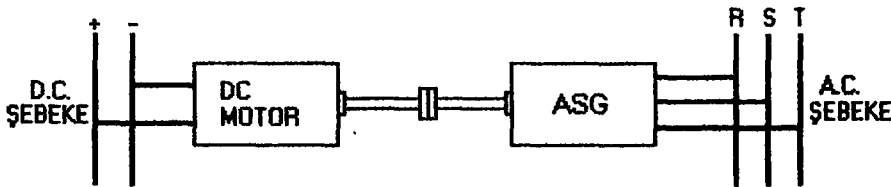
Asenkron makinaların generatör olarak çalıştırılabilmeleri için en önemli gereksinimleri, uyarım için gerekli olan reaktif mıknatıslanma akımıdır. Asenkron makinaların içinde herhangi bir uyarım devresinin olmamasından dolayı gerekli mıknatıslanma akımı dışarıdan sağlanmalıdır. Bu da iki yöntemle gerçekleştirilebilir;

Birinci yöntemde; senkron generatörler tarafından beslenen bir şebekeden ihtiyaç duydukları mıknatıslanma akımı sağlanır.

İkinci yöntemde ise; asenkron generatörün öz uyarımı stator uçlarına bağlanan uygun değerli bir kondansatör düzeneği ile elde edilir. Kondansatör uyarımlı asenkron generatörlerde, mıknatıslanma akımı bir kondansatör grubundan elde edilir. Asenkron makinaya bağlanan bu kondansatörlerin kapasite değerleri kendi kendini uyarma zamanını, üretilen gerilimin değerini ve frekansını etkilediği için rasgele seçilemez. Kondansatörler seçilirken maksimum verimin alınacağı kapasite değerinin hesaplanması gerekmektedir (Sarioğlu, 1983; Chan, 1992).

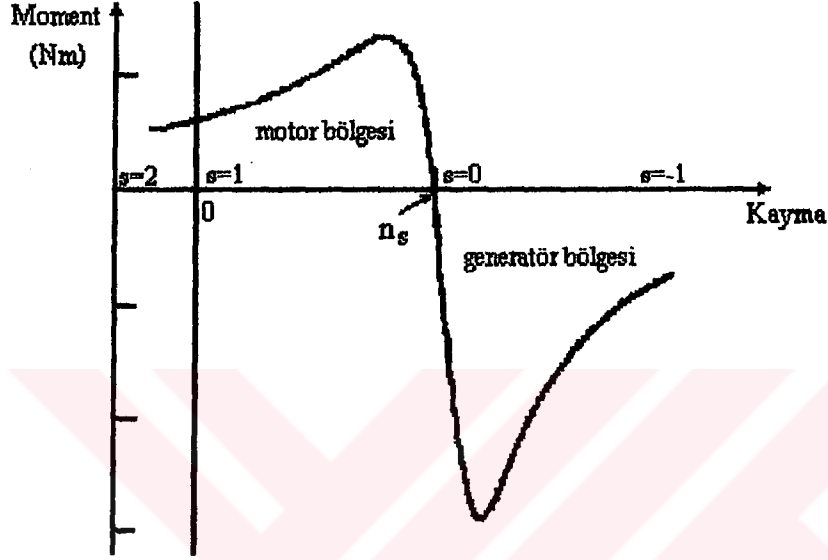
2.1.1 Asenkron Generatörün Şebeke İle Paralel Olarak Çalıştırılması

Bu yöntemde, asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif mıknatıslanma akımının sağlanması için senkron generatörler ile beslenen bir alternatif akım şebekesine ihtiyaç vardır. Asenkron generatör bu şebekeden gerekli olan akımı çekecek ve şebekeye sadece aktif güç verecektir.



Şekil 2.1 Şebeke ile paralel çalışan bir asenkron generatörün bağlantısı

Asenkron makinanın şebeke ile paralel bağlı iken generatör olarak çalışabilmesi için senkron devir sayısının üzerinde tahrik edilmesi de gerekmektedir. Senkron devir sayısının üzerine çıkabilmek için milinden başka bir makina yardımıyla tahrik edilmelidir (Singh, 1995; Boduroğlu, 1981).

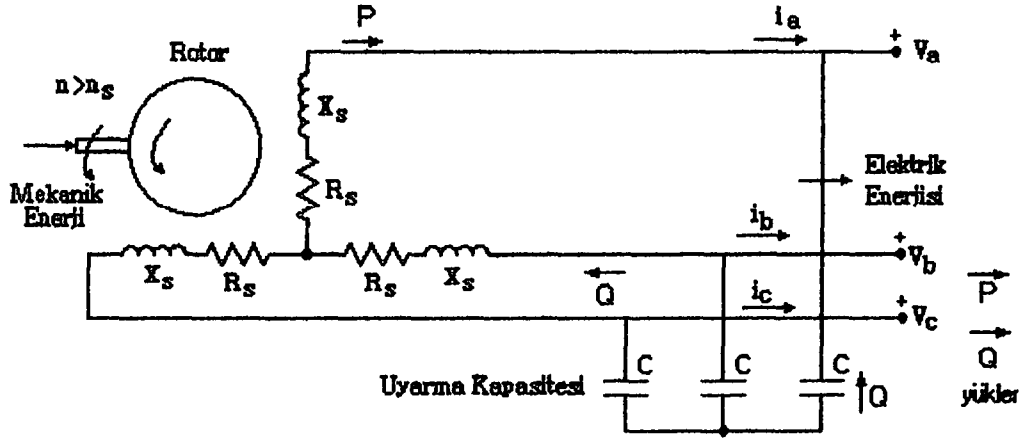


Şekil 2.2 Asenkron makinanın moment-kayma karakteristiği

Asenkron generatörler şebekeye bağlı olduğu için, generatörün ürettiği gerilim ve frekans şebeke tarafından belirlenmektedir.

2.1.2 Asenkron Generatörün Lokal Olarak Çalıştırılması

Asenkron generatör, senkron hızın üzerinde tahrik edildiğinde ve uçlarına gerekli mıknatıslanma akımını sağlayacak değerde kondansatörler bağlandığında kendi kendini uyarması sağlanabilir.

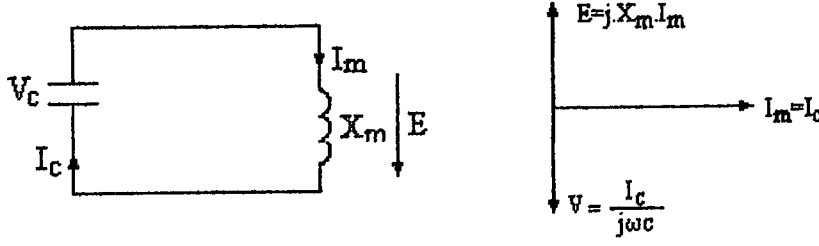


Şekil 2.3 Lokal olarak çalışan bir asenkron generatörün bağlantı şeması

Asenkron makinanın uçlarına kondansatörler bağlı iken , gerekli olan reaktif akımının sağlanabilmesi için kondansatörlerin yüklü olması gerekmektedir. Eğer generatör gerilimsiz durumda ise kondansatörleri dolduramayacak ve generatör kendi kendini uyaramayacaktır. Bunun sağlanabilmesi için, ilk gerilim, ya asenkron makinanın artık mıknatısiyetinden sağlanmalı ya da makinaya kısa bir süre için gerilim uygulanmalıdır (Fitzgerald ve diğ., 1983).

Asenkron generatör milinden tahrik edildiğinde rotorundaki artık mıknatısiyet sayesinde düşük bir gerilim üretir. Üretilen bu gerilim, gerilimin değerini artıracak bir kapasitif akım akmasını sağlayacaktır. Gerilimin artması ile kapasitif akımında değeri artacak ve bu karşılıklı artış gerilimin nominal değere gelip ulaşmasına kadar devam edecektir (Murthy ve diğ., 1982). Burada üretilen gerilimin değerini ve frekansını; döndürme hızı, dışarıdan bağlanan kondansatörlerin kapasite değerleri ve generatörün besleyeceği yük belirleyecektir. Asenkron makinaya bağlanan kondansatörlerin kapasite değerleri kendi kendini uyarma zamanını, üretilen gerilimin değerini ve frekansını etkilediği için rasgele seçilemez. Kondansatörler seçilirken maksimum verimin alınacağı kapasite değerinin hesaplanması gerekmektedir (Chan, 1992).

Kendi kendini uyarma işlevinin daha iyi anlaşılabilmesi için stator uçlarına yük bağlı değilken ve kaçak akımlar ile seri direnç kayıplarını ihmal ederek asenkron generatörün eşdeğer devresinin incelenmesi yararlı olacaktır.



Şekil 2.4 Basitleştirilmiş ve yüksüz durumda kondansatör ile asenkron generatörün kendinden uyarım devresi ve fazör diyagramı

Şekil 2.4' de görüldüğü gibi kondansatör akımı (I_c), makina akımına (I_m) eşittir ve fazör diyagramından da görüleceği gibi ilişkiler bir LC rezonans devresindeki gibidir. Bu durumda asenkron makina saf bir reaktans gibi davranır ve yukarıdaki varsayımlarla stator uç gerilimi aynı zamanda endüklenen emk (E)' ya eşittir ve

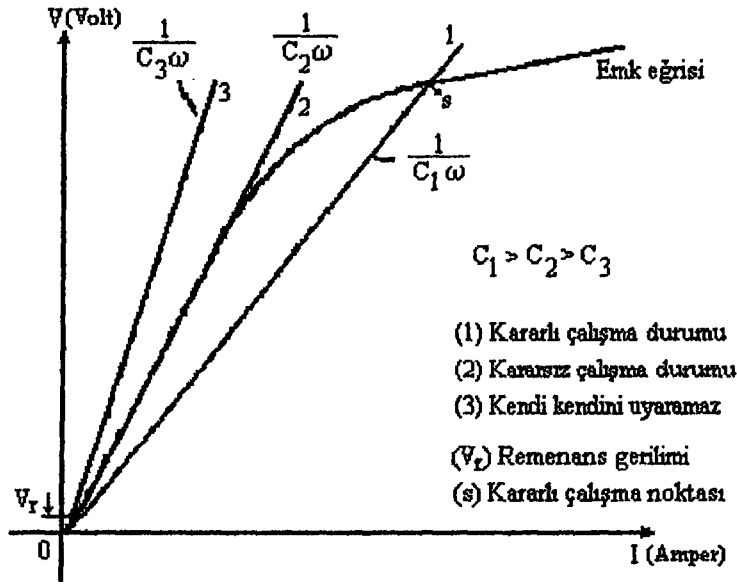
$$E = jX_m I_m \quad (2.1)$$

olur. Makinadaki doyma nedeniyle X_m reaktansı, I_m akımının doğrusal olmayan bir işlevidir ve doğrudan doğruya frekansla orantılıdır (Gratham ve diğ., 1989; Chan, 1994). Burada kondansatör gerilimi;

$$V_c = -j \frac{I_c}{2\pi f C} \quad (2.2)$$

olup; akım ile doğru, frekans ile ters orantılıdır.

Şekil 2.5' de asenkron generatörün $V=f(I)$ boşa çalışma karakteristiği ve makinanın uçlarına paralel bağlı kondansatör sisteminin $V_c = \frac{I}{C\omega}$ doğruları çizdirilmiştir.



Şekil 2.5 Asenkron makinanın boşa çalışma karakteristiği ve $V_c = \frac{I}{C\omega}$ eğrileri

Şekil 2.4' deki devreye göre gerilim değerleri birbirine eşittir. Bu durumda;

$$\frac{I_c}{2\pi f C} = I_m X_m \quad (2.3)$$

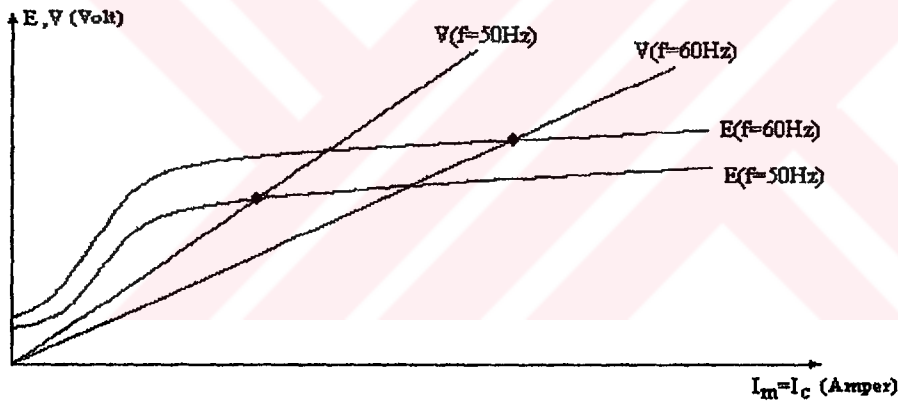
ve $I_c = I_m$ olur. Buna göre elde edilen eşitliklerin grafik çözümü Şekil 2.5' de emk eğrisi ile kondansatör gerilim eğrisinin kesim noktasında elde edilen kararlı çalışma noktası 's' ile gösterilmiştir. Belli bir hızda uyarımı sağlayabilmek için gerekli kondansatör değerinin bir alt sınırı vardır. Bu değerin altında uyarım sağlanamaz. Eğrilerin kesiştiği noktalar generatörün üretmiş olduğu gerilim değerine eşittir. Kapasite değeri ne kadar büyük olursa generatör çıkışından o kadar büyük gerilim elde edilir (Chakraborty ve diğ., 1998; Sarıoğlu, 1983).

2.2 Asenkron Generatörlerde Karşılaşılan Sorunlar

Generatörlerde üretilen gerilimin sürekli halde genlik değerinin ve frekansının değişmesi istenilmez. Asenkron generatörlerde gerekli şartlar sağlandıktan sonra uçlarından elde edilen gerilim ve frekans, generatörün uyarım şekline bağlı olarak

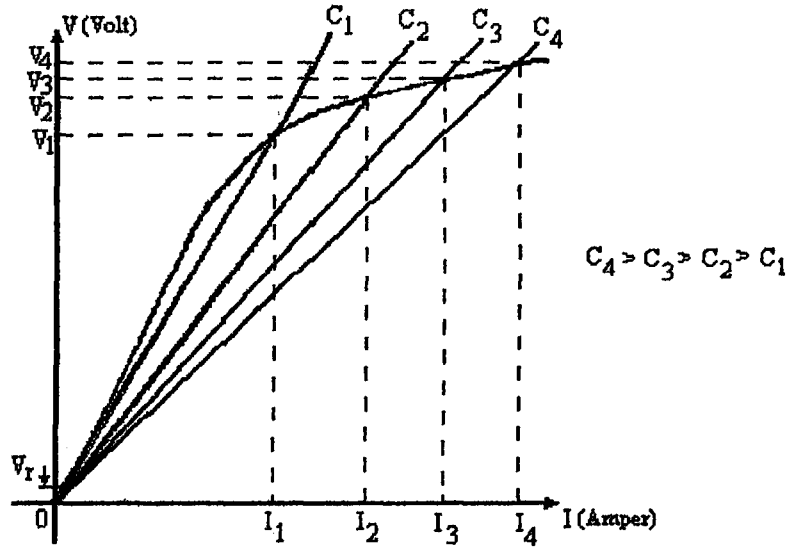
değişim gösterir ve asenkron generatörün gerilim ve frekans değerleri kolay kolay ayarlanamaz. Eğer asenkron generatör şebeke ile paralel olarak çalışıyorsa, üretilen gerilim ve frekans şebeke tarafından belirlenmektedir. Bu tür çalışmada asenkron generatör şebekeye sadece aktif güç verebilmektedir. Eğer asenkron generatör lokal olarak çalışıyorsa, üretilen gerilimin değeri ve frekansı; döndürme hızı, dışarıdan bağlanan kondansatörlerin kapasite değerleri ve generatörün besleyeceği yük belirleyecektir.

Asenkron generatör lokal olarak çalıştırıldığında gerilim üretebilmesi için emk (E) eğrisi ile kondansatör gerilim (V_c) eğrilerinin kesişmesi gerekmektedir. Emk eğrisi, makinanın X_m reaktansı ile, X_m reaktansı da doğrudan doğruya frekansla orantılıdır. Bu ilişkiyi en iyi simgeleyen gösterim Şekil 2.6' daki değişik dönme hızlarına karşılık gelen değişik frekanslardaki mıknatıslanma eğrileridir (Fidan, 1996).



Şekil 2.6 Kondansatör ile kendinden uyartım için çalışma noktaları

Eğrilerin kesiştiği noktalar gerekli uyartım değerinin sağlandığı ve generatörün üretmiş olduğu gerilim değerini verdiğinden, bu eğriler sayesinde değişik hız değerlerinde generatörün çıkış geriliminin değişimi gözlenebilir. Şekil 2.7' de değişik kapasite değerleri için yer alan kondansatör gerilim (V_c) eğrileri ve emk (E) eğrisi görülmektedir. Burada değişik kapasite değerlerinde çıkış geriliminin değişimi incelenebilmektedir. Buna göre kapasite değeri ne kadar büyük olursa generatör çıkışından o kadar büyük gerilim elde edileceği gözlenebilmektedir.



Şekil 2.7 Asenkron makinanın boşa çalışma karakteristiği ve $V_e = \frac{I}{C\omega}$ eğrileri

Asenkron generatörün üreteceği geriliminin değerini ve frekansını etkileyen bir diğer faktörde generatörün besleyeceği yüküdür. Asenkron generatör çalıştırıldıktan sonra yüklendiğinde; yük indüktif özellikli ise generatörün çıkış geriliminde çok aşırı düşüşler meydana gelecektir. Çünkü bağlanan indüktif yük indüktif akım çekecektir. Bu akımda kondansatörlerden sağlanacaktır. Bu durumda kondansatör akımı ikiye bölünüp bir kısmı generatöre, bir kısmı da yüke gidecektir. Bu durumda mıknatıslanma akımı düşecek ve dolayısıyla uç gerilimi de azalacaktır. Asenkron generatöre bağlanacak yük kapasitif özellikli ise generatörün uç gerilimi artacaktır. Çünkü uyarım kondansatörlerinin haricinde yük olarak bağlanacak olan kondansatörler mıknatıslanma akımının değerini artıracak ve bu da uç geriliminin artmasına neden olacaktır. Asenkron generatöre yük olarak direnç bağlandığı zaman güç değeri düşecek ve gerilim değeri azalacaktır. Ancak gerilimdeki bu azalma indüktif yükteki kadar fazla olmayacaktır.

Bu değişimlere göre; generatör yük ile çalışırken, kendinden çekilen akımın içerdiği indüktif bileşen ne kadar küçük olursa generatör uçlarında üretilen gerilim o kadar büyük olur. Örneğin saf omik yükte üretilen gerilim maksimumdur. Yüklendiği zaman generatör geriliminin sabit kalması için uyarım için bağlanan kondansatörlerin kapasiteleri değiştirilebilir. Omik ve indüktif yüklerde uygun değerde kondansatör

değerleri artırılmalı, kapasitif yükte ise kondansatör değerleri azaltılmalıdır. Bu sayede generatörün çıkış gerilimi sabit tutulabilir.

2.3 Asenkron Generatörler ile Senkron Generatörlerin Kıyaslanması

Elektrik enerjisi doğru ve alternatif akım olarak üretilir. Doğru ve alternatif akımın birbirlerine göre bazı üstünlükleri ve sakıncaları vardır.

Doğru akım için en önemli birkaç özellik şu şekilde sıralanabilir;

- Doğru akım depo edilip tekrar kullanılabilir.
- Doğru akım makinalarının devir ayarları geniş sınırlar içinde yapılabilir.
- Elektrikle yapılan yüzey kaplamacılığı ve maden arıtma işlerinde doğru akım gereklidir.

Alternatif akımda ise şu özelliklerden bahsedilebilir;

- Alternatif akım makinaları büyük güçlü olarak yapılabildiği için üretilen enerjinin birim fiyatı ucuz olur.
- Alternatif akımda kullanılan transformatörler yardımı ile enerji iletimi ve dağıtımı verimli bir şekilde yapılabilir. Hat kayıpları azalır.
- Alternatif akım makinalarının bakımı kolay olup doğru akım makinalarına göre daha az arıza yaparlar.

Elektrik enerjisi daha çok alternatif akım olarak üretilmektedir. Doğru akım gereken yerlerde alternatif akımdan faydalanılıp, alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesiyle gerekli olan yerlerde kullanılması sağlanabilir. Alternatif akım senkron generatörler ve asenkron generatörler tarafından üretilmektedir. Yüksek güçlerde alternatif akımın üretiminde daha çok senkron generatörler tercih edilmektedir. Çünkü senkron generatörler çok büyük güçlerde üretilirler ve yüksek güçlerde ileri ve geri güç faktöründe çalıştırabilirler. Bu nedenle termik, hidrolik ve nükleer santrallerde senkron generatörler kullanılır.

Bir senkron generatör ünitesi iki elemandan ibarettir. Bunlardan birincisi hareket ettirici tahrik ünitesi (türbin veya dizel motor), ikincisi ise senkron makinadır. Hareket ettirici tarafından elde edilen mekanik enerji senkron generatör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Senkron generatör, bir magnetik alan oluşturabilmek için doğru akımla uyarılan yuvarlak kutuplu bir rotora sahiptir. Bu rotor, stator sargılarında

elektromotor kuvveti endükleyebilmek için tahrik kaynağı tarafından döndürülür. Bu sayede stator sargılarında endüksiyon yolu ile bir elektromotor kuvveti oluşması sağlanır. Statorda oluşan bu elektromotor kuvveti fırça ve bileziklere gerek kalmadan doğrudan doğruya dış devreye alınarak ihtiyaç duyulan gerilim sağlanır.

Elektrik şebekelerini besleyen senkron generatörlerin besledikleri yükler günün her saatinde değişir ve bu yüklere göre senkron generatörlerin uç gerilimlerinde değişimler olur. Omik ve indüktif yük artışlarında senkron generatörlerin uç geriliminde azalmalar olurken, kapasitif yük artışlarında ise uç geriliminde yükselmeler olur. Oysa şebekeleri besleyen bu generatörlerin uç gerilimlerinin değişmeyip, sabit kalması istenilir. Bunun için her yük durumunda senkron generatörlerin uç gerilimlerini ayarlamak gerekir. Senkron generatörlerde gerilim değerinin ayarlanması, generatörün devir sayısının değiştirilmesi veya uyarım akımının değiştirilmesi ile sağlanabilir. Gerilimin ayarlanabilmesi için devir sayısının değiştirilmesi senkron generatörün frekansını da değiştireceğinden bu yol tercih edilmez. Dolayısıyla uyarım akımının değiştirilmesiyle gerilim ayarı daha uygundur.

Senkron generatörlerin uyarımı doğru akımla yapılır. Senkron makinanın en büyük dezavantajlarından bir tanesi de budur. Senkron generatörün değişik yük durumunda gerilimini sabit tutabilmesi için, uyarımlarının geniş sınırlar içerisinde ayarlanması gerekir. Senkron generatörün uyarımı, mile bağlı bir dinamodan ya da ayrı bir doğru akım kaynağından serbest uyarım şeklinde olabilir. Ayrıca kendinden uyarım ile de senkron generatörün uyarımı sağlanabilir.

Kendinden uyarım için senkron generatördeki artık mıknatısiyet gerilimi yükseltildikten sonra doğrultucular yardımı ile doğrultulup uyarım sargıları uyarılır. Bu sayede generatörün gerilimi yükseltilir. Yüksek güçlü ve düşük hızlı makinalarda uyarıcı kendinden uyarımlı olmayabilir. Bu nedenle sürekli mıknatışlı bir başka uyarıcı, generatörün uyarımını sağlar. Buna ilişkin iki türlü uyarım sistemi vardır.

1. Yarı iletken elemanlara sahip olan statik sistemler: Bu sistemlerde akım, bilezikler üzerinden rotora verilerek gerekli uyarım sağlanır.
2. Mile monte edilmiş fırçasız sistemler: Bunlar rotor ile beraber dönerler. Böylece fırça ve bileziklerden kaçınmak mümkün olur.

Uyartım akımının her türlü yük durumunda ayarlanması gerektiği belirtilmişti. Bu işlem el ile istenilen çabukta ve doğrulukta sağlanamaz. Bunun yerine çeşitli otomatik gerilim regülatörlerinden faydalanılır.

Şebekelerde yük durumuna göre senkron generatörlerin kendi aralarında ya da aynı şebekeyi besleyen diğer santrallerdeki senkron generatörler ile paralel bağlanma durumu söz konusudur. Generatörlerin paralel bağlanma nedenleri aşağıda belirtilmiştir:

1. Yük her zaman aynı olmadığından yük artışında artan yükü karşılayabilmektir.
2. Santralin en büyük yükünü karşılayabilecek büyük güçlü bir senkron generatör bulundurmak uygun değildir. Çünkü santral her zaman aynı yükle çalışamayacağından verim azalır.
3. Devrede birden fazla senkron generatör bulundurarak işletme emniyeti sağlanır. Çünkü arıza yapan senkron generatörler devre dışı edilip, sağlam senkron generatörler devreye alınarak beslemenin sürekliliği sağlanır.
4. Bakım kolaylığı sağlanır. Senkron generatörlerin bakımlarının yapılması gerektiğinde diğer senkron generatörler tarafından enerji sağlanarak, enerji kesintisi önlenir.

Senkron generatörlerin birbirleriyle paralel bağlanabilmesi için çeşitli senkronizasyon koşullarının yerine getirilmesi gerekir. Paralel bağlamada en önemli faktör akım darbesi ve gerilim dalgalanması oluşturmamaktır. Paralele girme sırasında devreden akım çekilmemeli veya devreye akım gönderilmemelidir. Bunu sağlayabilmek için şu koşullar yerine getirilmelidir:

1. Paralel bağlanacak senkron generatörlerin gerilimleri birbirine eşit olmalıdır.
2. Paralel bağlanacak senkron generatörlerin frekansları birbirine eşit olmalıdır.
3. Paralel bağlanacak senkron generatörlerin aynı fazları birbirine bağlanmalı, yani faz sıraları aynı olmalıdır.
4. Generatörlerin fazları bütün çalışma süresince üstüste olmalıdır.

Senkron generatörlerle hem aktif, hem de reaktif güç aktarımı yapılabilmektedir. Aktif güç aktarımı, generatöre verilen mekanik enerjinin ayarlanması ile, reaktif güç aktarımı ise generatörün uyartım akımını ayarlayarak gerçekleştirilir. Aktif güç

aktarımında frekansın, reaktif güç aktarımında ise gerilimin sabit kalması sağlanmalıdır (Saçkan, 1996; Peşint, 1996).

Şimdiye kadar anlatılan bilgilere dayalı olarak asenkron generatörlerin senkron generatörlere göre avantaj ve dezavantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- 1) Küçük ve orta güçteki asenkron generatörlerde, uyarma düzeneği ve kutup tekerleğinin gerektirdiği masrafları bulunmadığından aynı büyüklükteki senkron makinalara oranla hayli ucuzdurlar.
- 2) Asenkron generatörlerin fırça ve bilezikleri olmadığından bir kontrolöre ihtiyaçları yoktur ve mekanik yapıları sade olduğundan az arıza yaparlar.
- 3) Asenkron generatörün frekans ve faz durumlarının kontrolü yapılmaksızın paralel bağlanmaları imkanı vardır. Yani senkronlama problemleri yoktur. Senkron generatörlerin paralel bağlanabilmesi için senkronizasyon şartlarının yerine getirilmesi gerekir.
- 4) Asenkron generatörler yük değişimlerinde senkron makinalar gibi salınım yapmazlar ve senkron generatörlerde olduğu gibi ayrı bir doğru akım uyarma kaynağına ihtiyaç duymazlar.
- 5) Asenkron generatörlerde güç faktörü ($\cos\phi$) senkron makinada olduğu gibi ayar edilemez.
- 6) Asenkron generatörlerin , motorlarda olduğu gibi hava aralığı küçük olduğundan büyük güçlerde yataklanma problemi önem kazanmaya başlar. Bu nedenle büyük güçlerde üretimleri kısıtlıdır.
- 7) Asenkron generatörlerin enerji üretebilmesi için kondansatör ya da senkron generatörlerle beraber çalışma zorunluluğu bulunmaktadır. Ayrıca asenkron generatörler, senkron generatörlerin bağlı olduğu ağda çalışırken, ağın gerilim ve frekansı senkron generatörler tarafından belirlenir.

3. ASENKRON GENERATÖRÜN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

3.1 Giriş

Dinamik davranış modelleri, makinanın davranışının gerçek zamanda hesaplanmasını amaç edinmiştir. Bunun için, en çok kullanılan modelleme yöntemleri şunlardır:

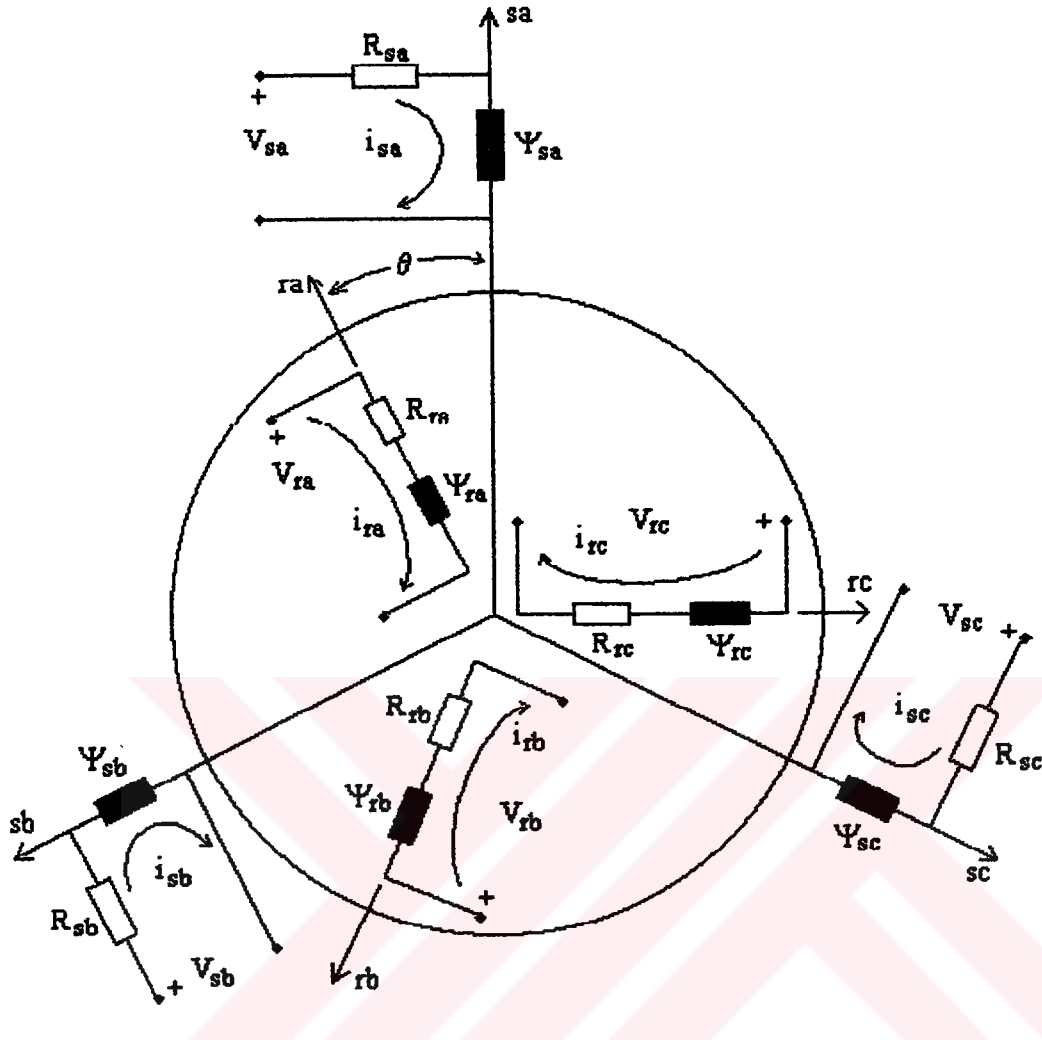
- 1) Faz değişkenleri modeli yaklaşımı
- 2) d-q eksen yaklaşımı
- 3) Uzay vektörü yaklaşımı
- 4) Simetrik bileşenler

Bütün bu yaklaşımlar stator faz sargılarının düzgün sinüs biçimli dağılımını varsayar. Yaklaşımlar arasındaki temel fark, seçilen referans eksen takımları ve modeller arası dönüşümlerden türetilen parametre tanıımıdır. Modeller için makina parametre ölçüm yöntemlerini de yaklaşımlar belirler.

Bu çalışmada asenkron generatörün denklemleri faz değişkenleri modeli yaklaşımı ile çıkarılmıştır. Faz değişkenleri modeli' nin üstünlüğü makina ait fiziksel büyüklükleri içermesiyle akım, gerilim ve moment değişimlerinin doğrudan belirlenmesidir. Ayrıca diğer model yaklaşımlarının çözümlerinin her anında veriler ve çıkış sonuçları faz değişkenlerini içermek zorundadır.

3.2 Bilezikli Asenkron Makina Denklemlerinin Faz Değişkenleri ile Yazılması

Şekil 3.1' de, radyal doğrultudaki hava aralığı sabit olan üç fazlı bilezikli asenkron makinanın gösterimi verilmiştir. Makinanın statorunda duran üç fazlı simetrik sargılar, rotorunda ise rotorla beraber dönen yine üç fazlı simetrik sargılar vardır. Üç fazlı düzende, faz büyüklükleri 'a', 'b', 'c' altsimgeleriyle, stator 's', rotor ise 'r' altsimgeleriyle gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Üç fazlı 2p=2 kutuplu bilezikli asenkron makinanın gösterimi

Stator ve rotor için toplam gerilim ifadesi (3.1) denkleminle tanımlanır. Bu ifadeye göre giriş gerilimi, sargı direncindeki gerilim düşümü ve toplam faz akısının değişimi veya indüklenen gerilimden oluşur.

$$V = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (3.1)$$

Buna göre stator ve rotor için gerilim ifadeleri;

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= R_{sa} i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} & V_{ra} &= R_{ra} i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\
 V_{sb} &= R_{sb} i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} & V_{rb} &= R_{rb} i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\
 V_{sc} &= R_{sc} i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} & V_{rc} &= R_{rc} i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

şeklinde değişir.

Magnetik akı, akım ile üretilen akı arasındaki bağıntıyı kuran indüktans değerleriyle akımın çarpımından elde edilir. Bir faz toplam akısı ise fazın öz indüktansı ile kendi akımının çarpımı ile diğer fazların kendi akımlarının bu faza göre karşılıklı indüktanslarıyla çarpımlarının toplamıdır. Stator ve rotor sargılarının kendi aralarında yönlerine göre bu akımların işareti değişik alındığından stator akımları eksi işaretli alınır. Dönme açısı ‘ θ ’ ile gösterilirse, elektriksel açı olarak ‘ $p.\theta$ ’ olur. Burada ‘ p ’ çift kutup sayısıdır. Aşağıdaki ifadelerde $p=1$ alınmıştır.

Buna göre stator tarafının akı denklemleri;

- a-fazı için;

$$\psi_{sa} = L_{s,aa} i_{sa} - L_{s,ab} i_{sb} - L_{s,ac} i_{sc} + M_{sa,ra} \cos\theta i_{ra} + M_{sa,rb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + M_{sa,rc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc} \tag{3.3}$$

- b-fazı için;

$$\psi_{sb} = -L_{s,ba} i_{sa} + L_{s,bb} i_{sb} - L_{s,bc} i_{sc} + M_{sb,ra} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + M_{sb,rb} \cos\theta i_{rb} + M_{sb,rc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc} \tag{3.4}$$

- c-fazı için;

$$\psi_{sc} = -L_{s,ca} i_{sa} - L_{s,cb} i_{sb} + L_{s,cc} i_{sc} + M_{sc,ra} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + M_{sc,rb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + M_{sc,rc} \cos\theta i_{rc} \quad (3.5)$$

Rotor tarafının akı denklemleri;

- a-fazı için;

$$\psi_{ra} = L_{r,aa} i_{ra} - L_{r,ab} i_{rb} - L_{r,ac} i_{rc} + M_{ra,sa} \cos\theta i_{sa} + M_{ra,sb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sb} + M_{ra,sc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sc} \quad (3.6)$$

- b-fazı için;

$$\psi_{rb} = -L_{r,ba} i_{ra} + L_{r,bb} i_{rb} - L_{r,bc} i_{rc} + M_{rb,sa} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sa} + M_{rb,sb} \cos\theta i_{sb} + M_{rb,sc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sc} \quad (3.7)$$

- c-fazı için;

$$\psi_{rc} = -L_{r,ca} i_{ra} - L_{r,cb} i_{rb} + L_{r,cc} i_{rc} + M_{rc,sa} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sa} + M_{rc,sb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sb} + M_{rc,sc} \cos\theta i_{sc} \quad (3.8)$$

Dengeli üç fazlı enerji sisteminin gereği olarak 0_s ve 0_r yıldız noktaları için yazılacak Kirchhoff'un akım denkleminde;

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$$

$$i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0$$

(3.9)

olur. Simetrik makinada sargılar özdeş, stator ve rotor çevresi düzgün, hava aralığı sabit olduğundan şu eşitlikler yazılabilir.

$$R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s \quad (3.10.a)$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r \quad (3.10.b)$$

$$L_{s,aa} = L_{s,bb} = L_{s,cc} = L_{ss} \quad (3.11.a)$$

$$L_{r,aa} = L_{r,bb} = L_{r,cc} = L_{rr} \quad (3.11.b)$$

$$L_{s,ab} = L_{s,ac} = L_{s,ba} = L_{s,bc} = L_{s,ca} = L_{s,cb} = L_{sm} \quad (3.11.c)$$

$$L_{r,ab} = L_{r,ac} = L_{r,ba} = L_{r,bc} = L_{r,ca} = L_{r,cb} = L_{rm} \quad (3.11.d)$$

$$M_{sa,rb} = M_{sa,rc} = M_{sb,ra} = M_{sb,rc} = M_{sc,ra} = M_{sc,rb} = M_{sa,ra} = M_{sb,rb} = M_{sc,rc} = L_{sr} \quad (3.12.a)$$

$$M_{ra,sb} = M_{ra,sc} = M_{rb,sa} = M_{rb,sc} = M_{rc,sa} = M_{rc,sb} = M_{ra,sa} = M_{rb,sb} = M_{rc,sc} = L_{rs} \quad (3.12.b)$$

$$L_S = L_{rs} + L_{ss} \quad (3.13.a)$$

$$L_R = L_{sr} + L_{rr} \quad (3.13.b)$$

$$L_a = L_S + L_{sm} = L_{Rs} + L_{ss} + L_{sm} \quad (3.13.c)$$

$$L_b = L_R + L_{rm} = L_{Rr} + L_{rr} + L_{rm} \quad (3.13.d)$$

Bu kısaltmalara göre makina ait direnç matrisi ve toplam akı matrisi;

$$\begin{bmatrix} R_{sa} \\ R_{sb} \\ R_{sc} \\ R_{ra} \\ R_{rb} \\ R_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & L_{sr} \cos \theta & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 & L_a & 0 & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \theta & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 & 0 & L_a & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \theta \\ L_{rs} \cos \theta & L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_b & 0 & 0 \\ L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \theta & L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 0 & L_b & 0 \\ L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \theta & 0 & 0 & L_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

olur. Toplam akılarla akımlar arasındaki bağıntılarda indüktans matrisini oluşturur.

$$[L_{s,r}] = \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & L_{sr} \cos \theta & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 & L_a & 0 & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \theta & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 & 0 & L_a & L_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sr} \cos \theta \\ L_{rs} \cos \theta & L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_b & 0 & 0 \\ L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \theta & L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 0 & L_b & 0 \\ L_{rs} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{rs} \cos \theta & 0 & 0 & L_b \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$[\Psi_{s,r}] = [L_{s,r}] [i_{s,r}] \quad (3.17)$$

Denklem (3.17), (3.15)' in kapalı formu olup Denklem (3.16) indüktans matrisinin açık halini içerir. İndüktans matrisinin türevi ise (3.18) denklemiyle verilir.

$$\frac{dL_{s,r}}{d\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_{sr}\sin\theta & -L_{sr}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sr}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & 0 & 0 & -L_{sr}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sr}\sin\theta & -L_{sr}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & 0 & 0 & -L_{sr}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sr}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sr}\sin\theta \\ -L_{rs}\sin\theta & -L_{rs}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{rs}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ -L_{rs}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{rs}\sin\theta & -L_{rs}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ -L_{rs}\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{rs}\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & -L_{rs}\sin\theta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

(3.14) ve (3.15) matrisleri (3.1)' de yerlerine konulursa, gerilim denkleminin kapalı gösterimi aşağıdaki gibi bulunur.

$$[V_{s,r}] = [R_{s,r}][i_{s,r}] + [L_{s,r}] \frac{d[i_{s,r}]}{dt} + \frac{d[L_{s,r}]}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} [i_{s,r}] \quad (3.19)$$

Stator ile rotor arasındaki ortak indüktans ifadeleri rotorun konum açısına bağlı olarak değiştiğinden, zamana göre türevinden dolayı rotor konum açısının türevi gerilim ifadesine girer. Konum açısının türevi rotorun açısal hızını verir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.20)$$

4. ASENKRON GENERATÖRÜN PSPICE MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

4.1 Giriş

Bu bölümde, statoruna kondansatör bağlı asenkron generatörün direkt faz modelinin tam eşdeğer devresi ve denklemleri kullanılarak bir benzetimi gerçekleştirilmiştir. PSPICE analog devre çözüm programına dayanan bu model ile makinanın sargıları arasında gerçek fiziksel bağlantıların incelenmesi ve kontrol tekniklerinin daha ayrıntılı olarak gösterilmesi amaçlanmıştır.

PSPICE ve benzeri modern devre programları elektrik devrelerinin zaman domeninde geçici ve sürekli rejim çözümlerini yaparak devrenin tasarımında kolaylık sağlarlar. Kurulan model bu analiz yöntemine dayanmaktadır.

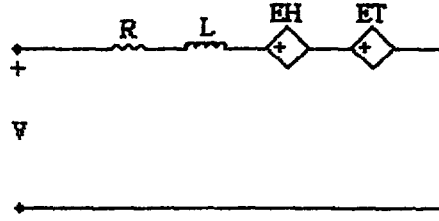
4.1.1 Zaman Domeni Matematiksel Modeli

Statoruna kondansatör bağlı asenkron generatör için elde edilen faz değişkenleri modeli PSPICE benzetiminde kullanılmıştır. Bu modele ilave olarak bilinen elektromekanik tanımlamalar ve denklemler de geçerli olduğundan, PSPICE programı tabanına uygun olarak elektriksel devreler yardımıyla, bu denklemlerin benzetimi de yapılmıştır.

4.1.2 Elektriksel Devre Tanımlamaları

Bilinen direkt faz modeli, stator ve rotora ait üç' er fazın kendi aralarında yıldız veya üçgen bağlantısını ifade eder. Burada generatörün stator ve rotor sargıları için yıldız bağlantı kullanılmıştır.

Denklem (3.19)' da verilen stator ve rotor için toplam gerilim ifadesinde açılal hızı ve indüktansların türevlerine bağımlı olarak yazılan terimlere "hareket gerilimleri", akımın türevlerine bağımlı terimlere ise "transformatör gerilimleri" denilmektedir. Bu tanımlamalara göre, stator veya rotorun bir fazı için geçerli olacak şekilde çizilen eşdeğer devre Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



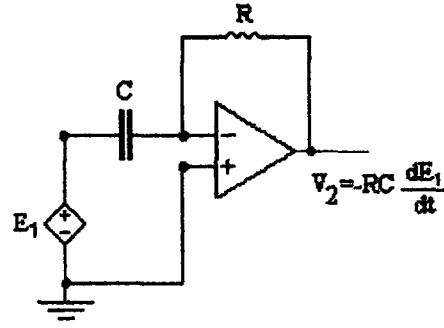
Şekil 4.1 Stator veya rotor bir fazına ait tam eşdeğer devre

Burada R ve L bir fazın sargı direnci ve öz indüktans değerleridir. İndüklenen gerilimler ise, hareket ve transformatör gerilimleri olarak iki bağımlı gerilim kaynağıdır.

4.1.3 Endüklenen Gerilim Tanımlamaları

Akımların zamana ve indüktansların dönme açısına göre türevlerinin hesaplanması ile belirli bir zaman ve dönme açısı için indüklenen gerilimlerin değerleri bulunabilir. İndüktansların türev fonksiyonları bilinmektedir ve hareket geriliminin belirli zaman ve dönme açısı için değeri doğrudan hesaplanabilir. Akımların türevleri ise faz akımlarının değişimi tam bilinemeyeceğinden her zaman dilimi içinde türevi alınarak transformatör gerilimlerinin değeri hesaplanır. Her iki gerilim ifadeleri de dönme açısını içermektedir.

Akımların türevlerini bulmak için Şekil 4.2' deki devre kullanılmıştır. Türev devresi, girişine gelen gerilimin türevini alarak "RC" çarpanı ile çarpıp, faz çevirici özelliği ile işaretini değiştirerek çıkış gerilimi " V_2 " değerini verir. Türev devresinin girişindeki bağımlı gerilim kaynağının değeri stator ve rotor faz akımlarının değerleri olarak seçilirse, altı türev devresi ile değişken faz akımlarının gerçek zamandaki türevleri hesaplanır.



Şekil 4.2 Türev devresi

Ayrıca asenkron generatörün lokal çalışabilmesi için gerekli olan artıkmıknatisiyet değeri, burada bir gerilim kaynağı olarak tanımlanmıştır. Bu sayede uyarım için gerekli olan gerilim değeri sağlanabilmektedir.

4.1.4 Ani Moment İfadesi Ve Elektromekanik Tanımlamalar

Asenkron makinada her t anında indüklenen moment ifadesi ;

$$M_m(t) = \frac{p}{2} [i_{s,r}]^t \frac{d[L_{s,r}]}{d\theta} [i_{s,r}] \quad (4.1)$$

şeklinde yazılır.

İndüktans matrisinin türevi bu denklemde yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$M_m(t) = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} & i_{ra} & i_{rb} & i_{rc} \end{bmatrix} \frac{d[L_{s,r}]}{d\theta} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
M_m(t) = \frac{p}{2} (-L_s) & \left[i_{sa} i_{ra} \sin\theta + i_{sa} i_{rb} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sa} i_{rc} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sb} i_{ra} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sb} i_{rb} \sin\theta \right. \\
& + i_{sb} i_{rc} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{ra} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{rb} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{rc} \sin\theta + i_{ra} i_{sa} \sin\theta \\
& + i_{ra} i_{sb} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{ra} i_{sc} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{rb} i_{sa} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{rb} i_{sb} \sin\theta + i_{rb} i_{sc} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
& \left. + i_{rc} i_{sa} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{rc} i_{sb} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{rc} i_{sc} \sin\theta \right] \quad (4.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_m(t) = -p(L_s) & \left[i_{sa} i_{ra} \sin\theta + i_{sa} i_{rb} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sa} i_{rc} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sb} i_{ra} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sb} i_{rb} \sin\theta \right. \\
& \left. + i_{sb} i_{rc} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{ra} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{rb} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} i_{rc} \sin\theta \right] \quad (4.4)
\end{aligned}$$

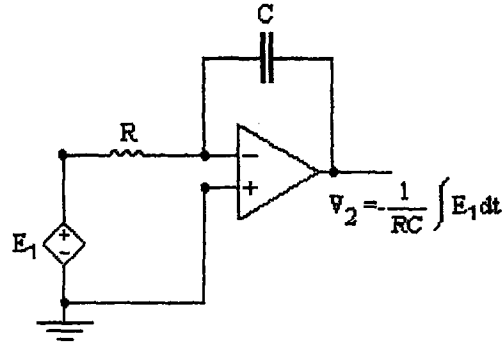
elde edilir. Asenkron generatör için hareket denklemi ise;

$$M_y = M_m + j \frac{d\omega}{dt} + B(\omega) \quad (4.5)$$

olup, mekanik hızı bulmak için bu denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{j} (M_y - M_m - B(\omega)) \quad (4.6)$$

Bu denklemden hızın integral yoluyla bulunması gerektiği görülür. İntegral sonunda açısal hız hesaplanınca, (3.20) denklemi gereğince, açısal hızın integrali alınarak dönme açısı bulunur. Bu integral işlemi için Şekil 4.3' deki integral devresi kullanılmıştır.

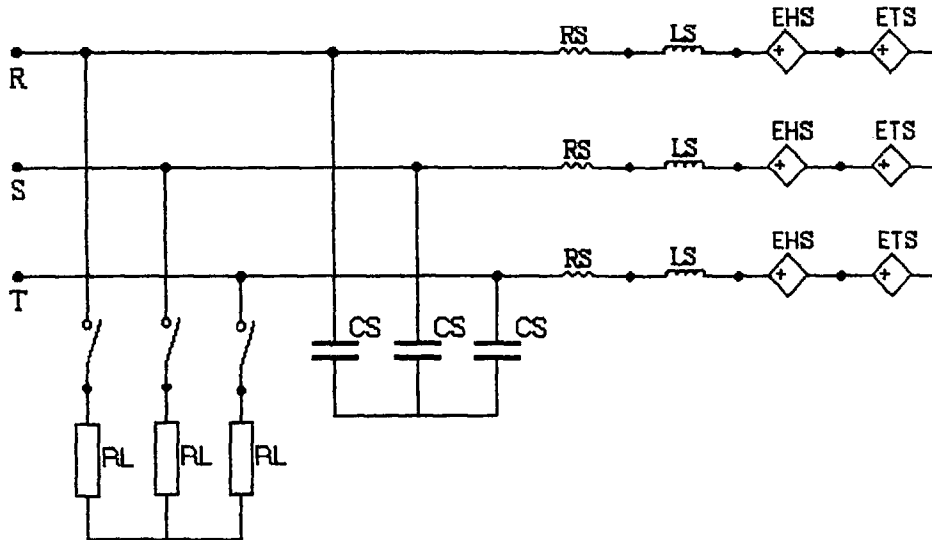


Şekil 4.3 İntegral devresi

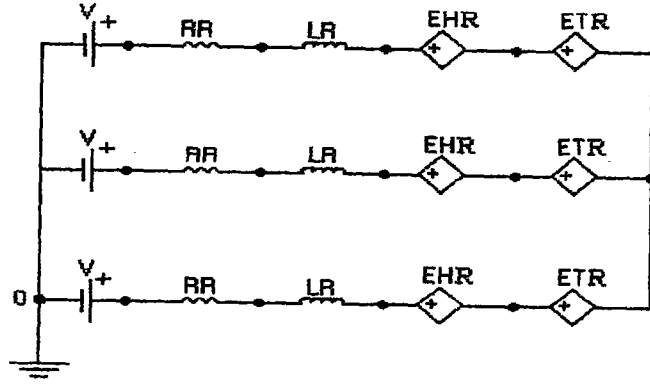
İntegral devresi, girişine gelen gerilimin integralini alarak, $\frac{1}{RC}$ çarpanı ile çarpıp, faz çevirici özelliği ile işaretini değiştirerek çıkış gerilimi V_2 değerini verir. İntegral devresinin girişindeki bağımlı kaynağın değeri (4.4) denkleminde bulunan indüklenen moment değerine eşit alınırsa, çıkış gerilimi olarak işaret değişikliği ile açısal hız ω bulunur.

Benzer şekilde (3.20) denklemine göre, açısal hızın integrali ile de dönme açısı θ bulunur. θ' nin bulunması indüklenen gerilim ve moment değerlerinin hesaplanabilmesini sağlar. Böylece tüm sistemin benzetimi sonuçlandırılmış olur.

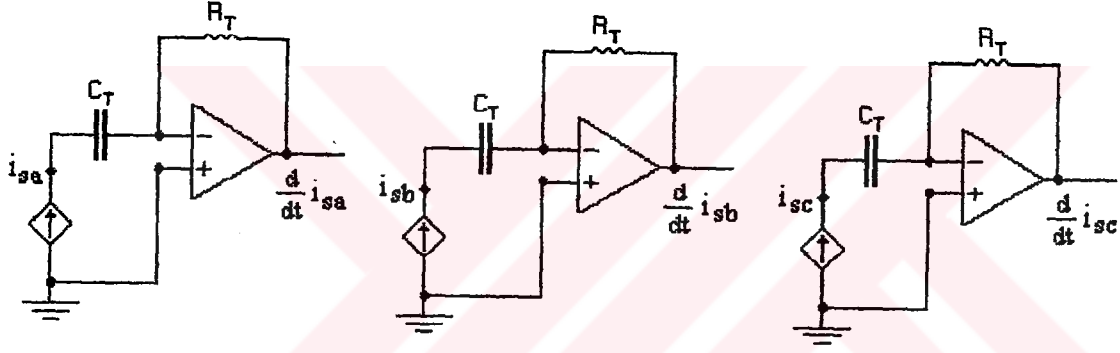
Bu tanımlamaların üç faz için ortaya çıkardığı devreler Şekil 4.4-4.8' de verilmiştir.



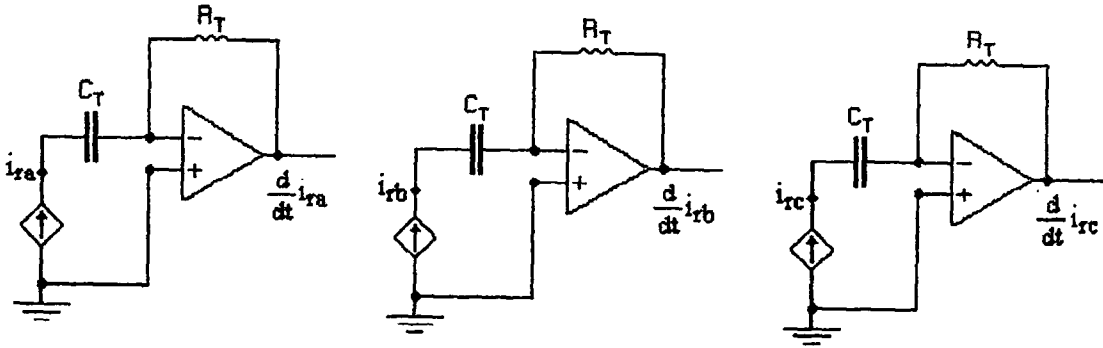
Şekil 4.4 Asenkron generatörün direkt faz tam eşdeğeri (stator eşdeğeri)



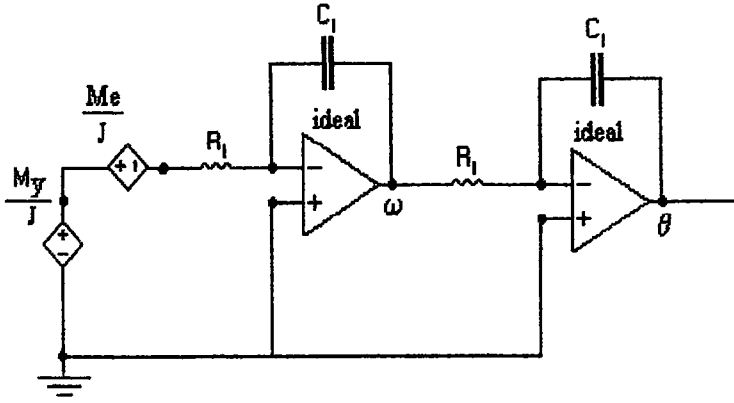
Şekil 4.5 Asenkron generatörün direkt faz tam eşdeğeri (rotor eşdeğeri)



Şekil 4.6 Stator akımlarının türevlerini alan devreler



Şekil 4.7 Rotor akımlarının türevlerini alan devreler



Şekil 4.8 Elektromekanik tanımlamaları gerçekleyen devreler

4.2 Teorik ve Deneysel Sonuçlar

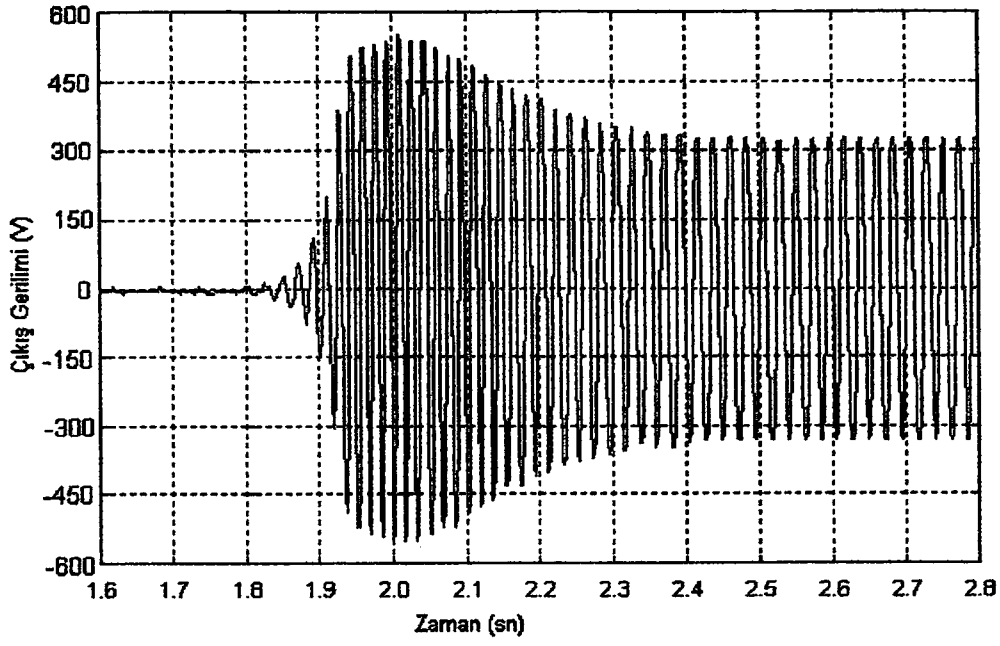
Kullanılan asenkron generatör için değişik frekans, kondansatör ve yük değerleri için elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Böylece motorun dinamik davranışını modelleyen PSPICE benzetiminin doğruluğu ortaya konulmuştur. Verilen sonuçlar ile kendinden uyarımlı asenkron generatörünün çalışmasını etkileyen tüm büyüklüklere göre elde edilebilecek tüm değişimler gözlenebilmektedir.

4.2.1 Generatörün Kendi Kendini Uyartım Süresince Ürettiği Gerilimin Değişimi

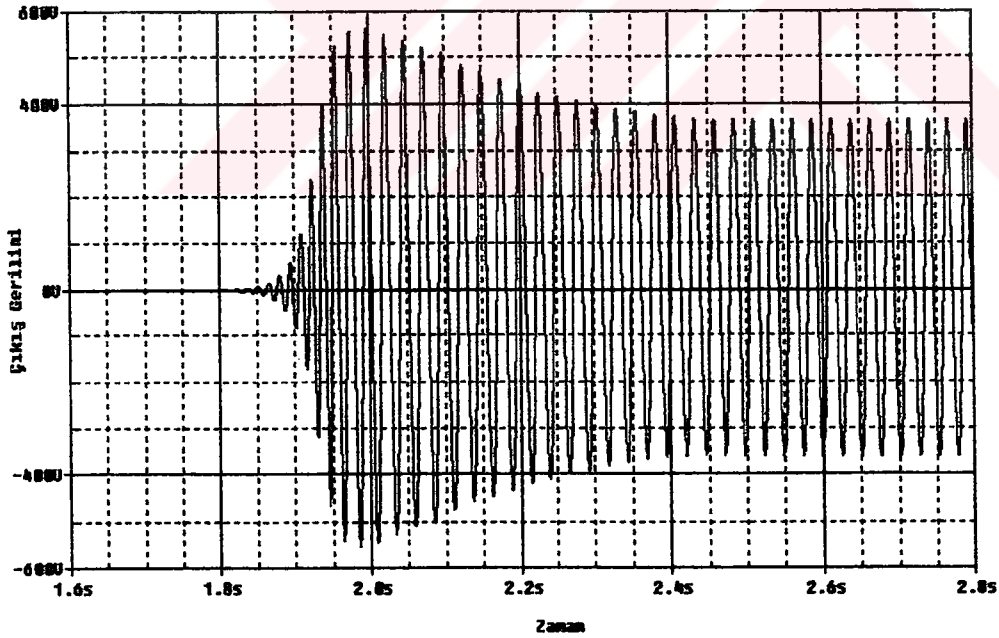
Şekil 4.9' da, asenkron generatörün uçlarında uyartım için 154 μF ' lık kondansatörler bağlı iken, generatörün kendi kendini uyartım süresince ürettiği gerilimin değişiminin deney ve benzetim programı sonucu verilmiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere generatör gerilimi üretilmeye başladığından 0.6 saniye sonra sürekli duruma ulaşabilmektedir.

Şekil 4.10' da ise asenkron generatörün uçlarında uyartım için 171 μF ' lık kondansatörler bağlı iken, generatörün kendi kendini uyartım süresince ürettiği gerilimin değişiminin deney ve benzetim programı sonucu verilmiştir. Bu sonuçlara göre generatör gerilimi üretilmeye başladığından 0.58 saniye sonra sürekli duruma ulaşabilmektedir.



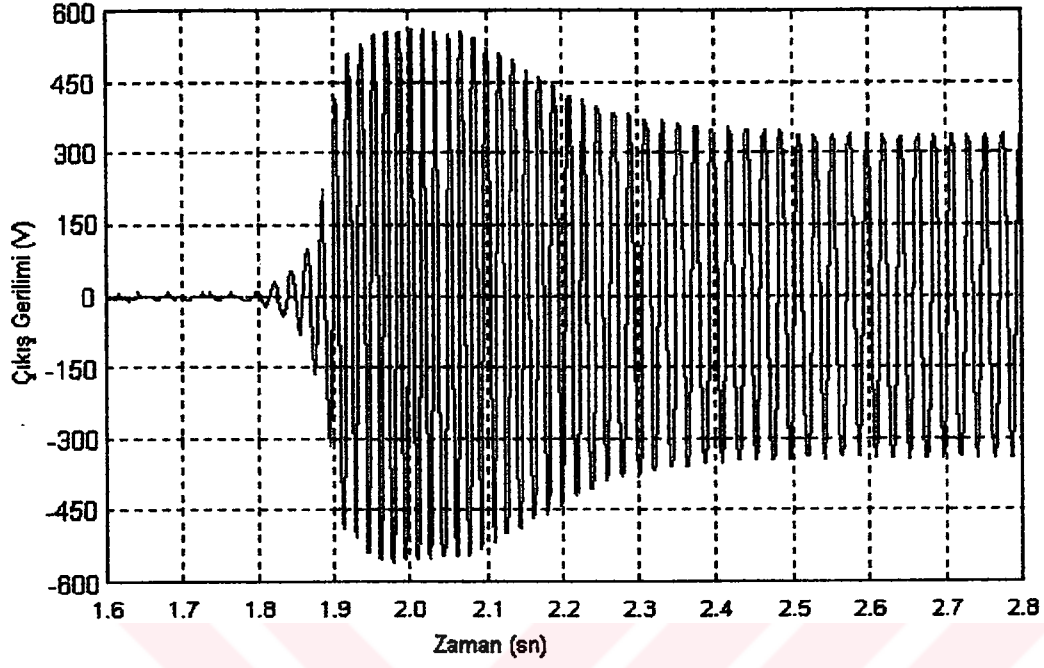


a) Deney sonucu

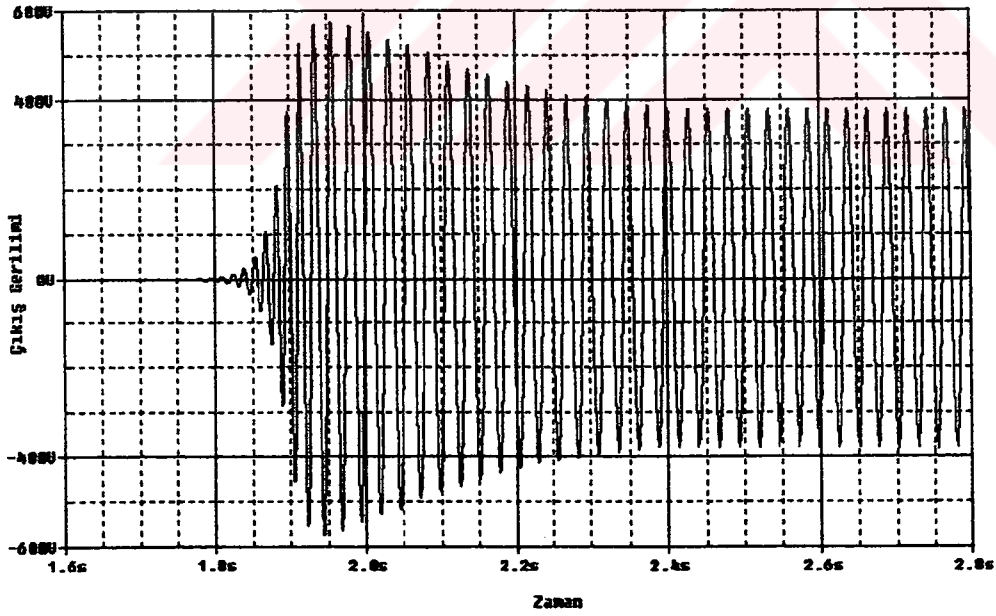


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.9 154 μF 'lık uyartım kondansatörü için generatörün kendi kendini uyartım süresince uç geriliminin değişimi



a) Deney sonucu



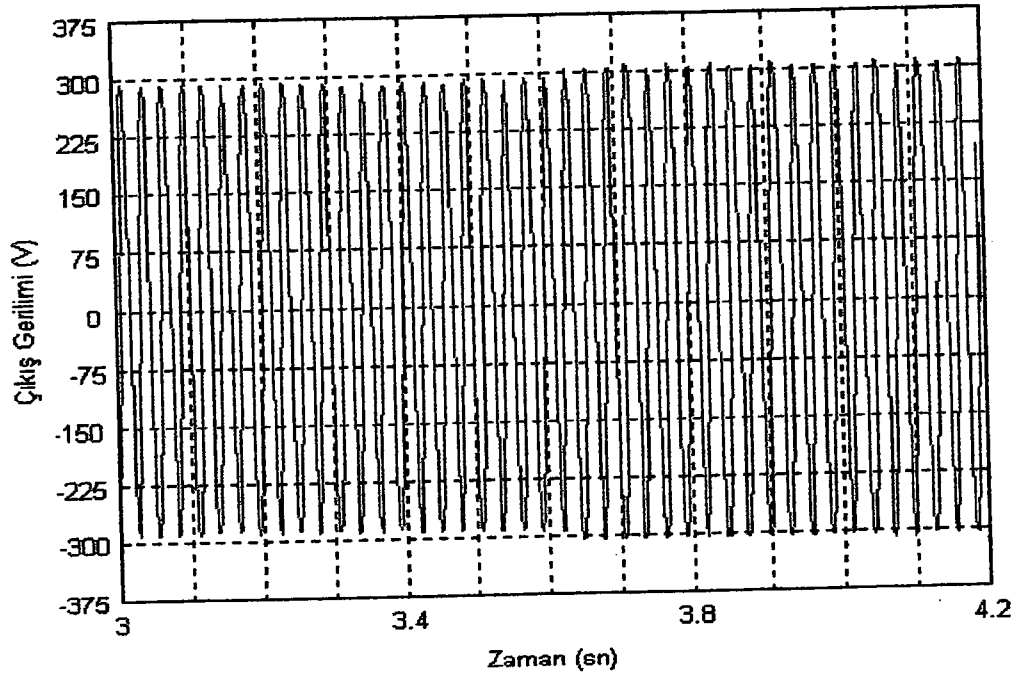
b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.10 171 μF 'lık uyarım kondansatörü için generatörün kendi kendini uyarım süresince uç geriliminin değişimi

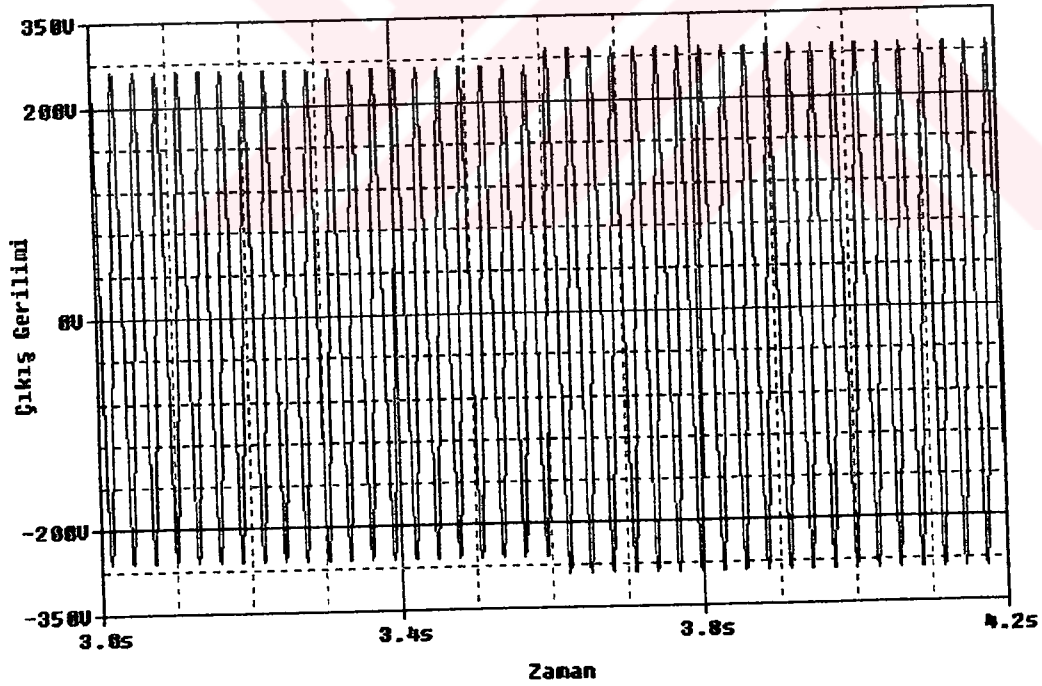
4.2.2 Uyartım Kondansatörlerinin Değerlerinin Değiştirilmesi Durumunda Generatör Geriliminin Değişimi

Şekil 4.11' de asenkron generatörün uçlarına uyartım için bağlanan kondansatörlere paralel olarak başka kondansatörler ilave edildiğinde asenkron generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Burada generatör, önce 120 μF ' lık kondansatör ile uyarılmış, 3.5 saniye sonra uyartım kondansatörü 154 μF değerine çıkarılmıştır. Bu durumda generatörün üretmiş olduğu gerilimin arttığı deneysel ve benzetim sonuçlarından gözlenmiştir.

Şekil 4.12' de 120 μF ' lık kondansatör grubuna ilave olarak alınmış olan 34 μF ' lık kondansatör çıkarıldığı zaman generatörün üretmiş olduğu gerilimdeki değişimin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Toplam 154 μF ' lık uyartım kondansatörü grubundan 7.5 saniye sonra 34 μF ' lık kondansatör çıkarıldığında generatörün geriliminin azaldığı deney sonucundan ve benzetim sonucundan gözlenmiştir.

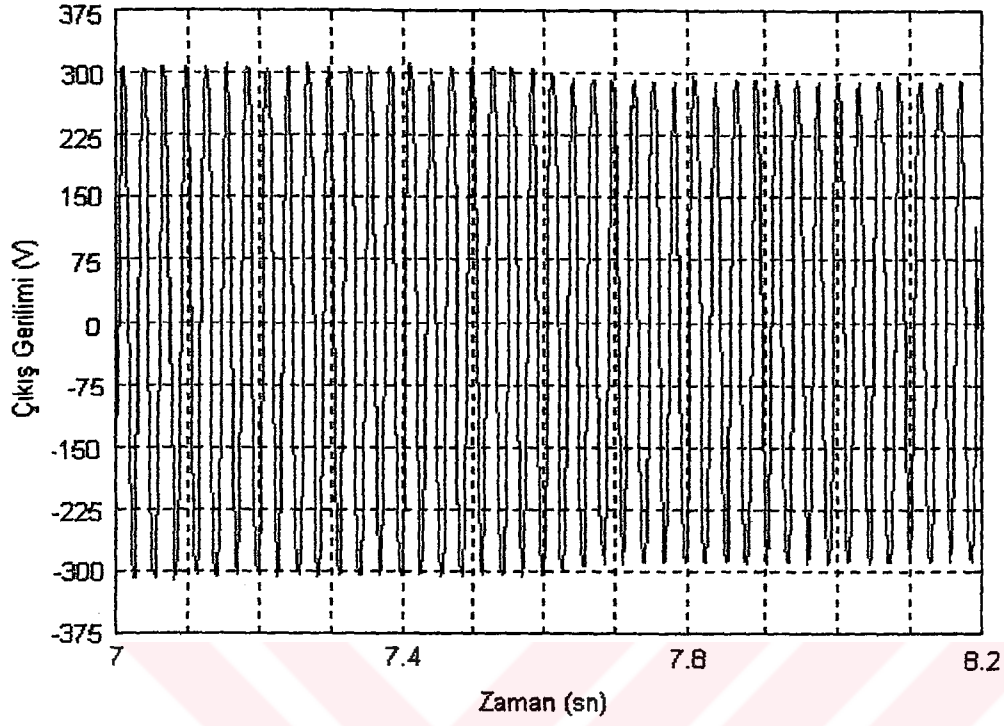


a) Deney sonucu

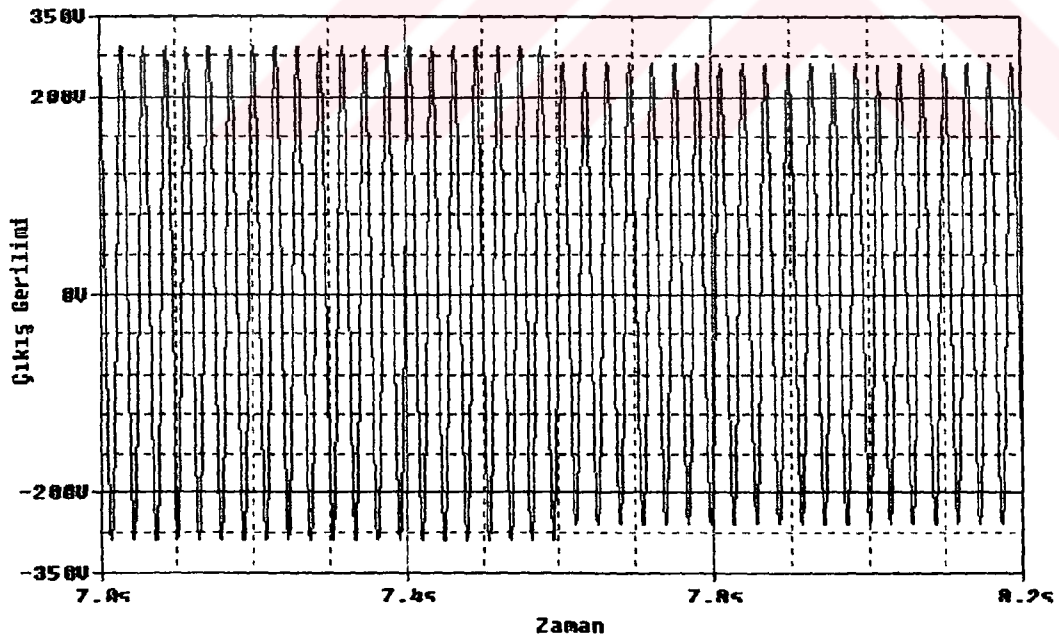


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.11 120 μF 'lık uyartım kondansatörünün 154 μF 'a çıkarılması durumunda generatörün geriliminin değişimi



a) Deney sonucu



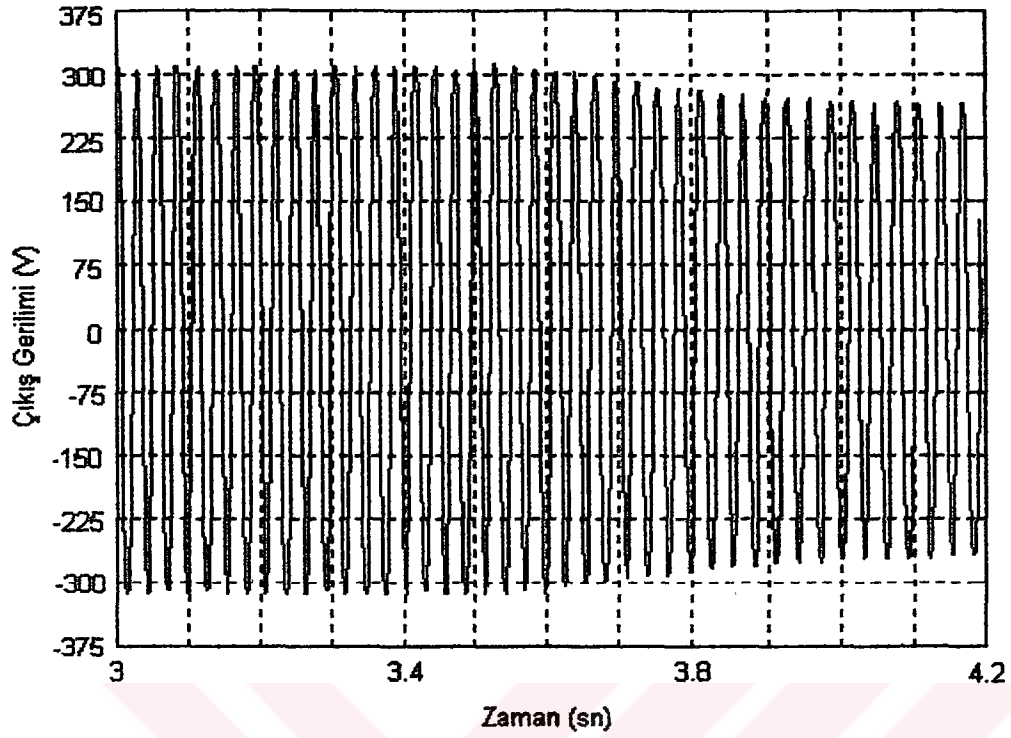
b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.12 154 μF 'lık uyarım kondansatörünün 120 μF 'a indirilmesi durumunda generatörün geriliminin değişimi

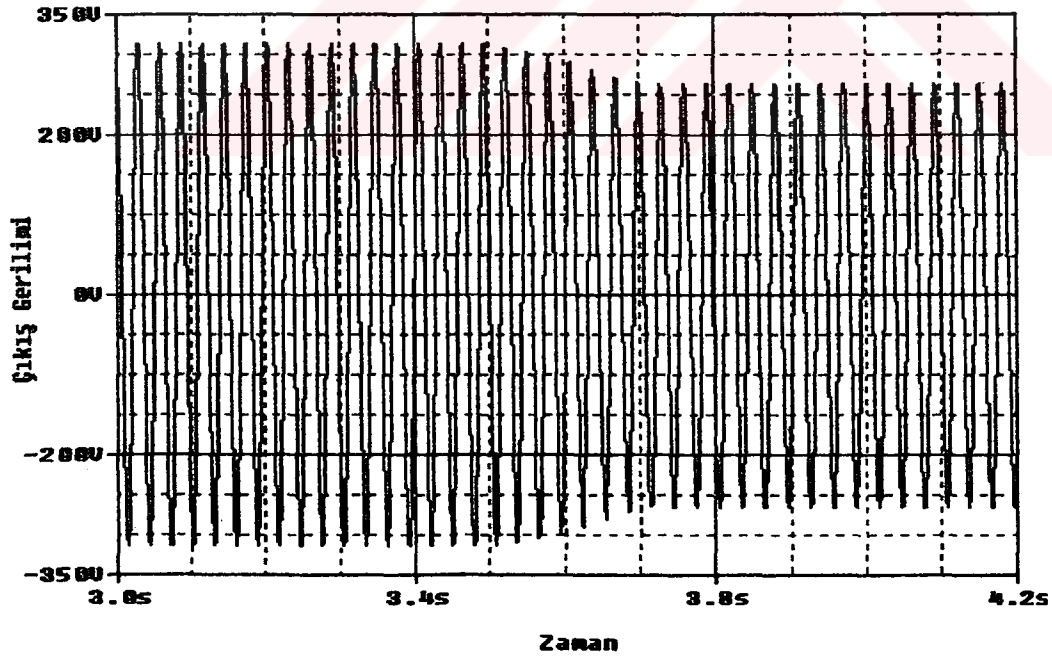
4.2.3 Tahrik Hızının Değiştirilmesi Durumunda Generatör Gerilimindeki Değişimler

Şekil 4.13' de 1318 dev/dk' lık bir hızla tahrik edilen generatörün hızının 3.5 saniye sonra 1190 dev/dk' ya düşürülmesi sonucunda üretilen gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Burada uyartım kondansatörü sabit olup değeri 137 μF ' dır ve tahrik hızı asenkron generatörün miline bağlı olan bir doğru akım motorunun kontrolü ile ayarlanmaktadır. Elde edilen deneysel ve benzetim sonuçlarından görüldüğü üzere tahrik hızının azaltılması generatörün üretmiş olduğu gerilimin azalmasına neden olmuştur.

Şekil 4.14' de 1190 dev/dk' lık bir hızla tahrik edilen generatörün hızının 7.5 saniye sonra 1354 dev/dk' ya yükseltilmesi sonucunda üretilen gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Uyartım kondansatörünün değeri 137 μF ' dır. Tahrik hızının artırılması generatörün üretmiş olduğu gerilimin artmasına neden olduğu elde edilen deneysel ve benzetim sonuçlarından görülmektedir.

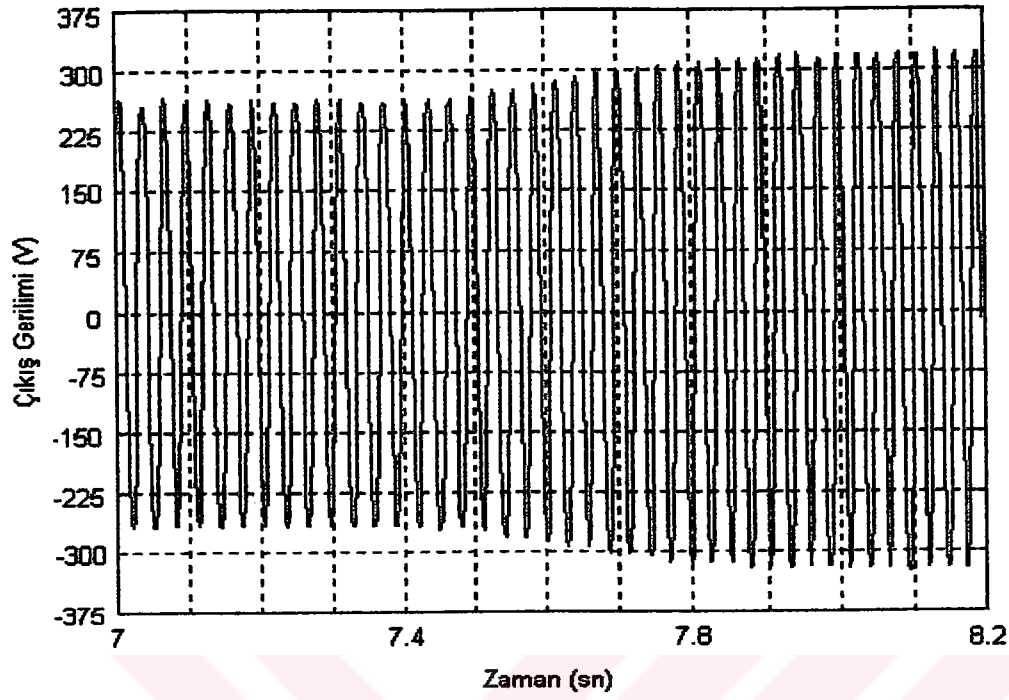


a) Deney sonucu

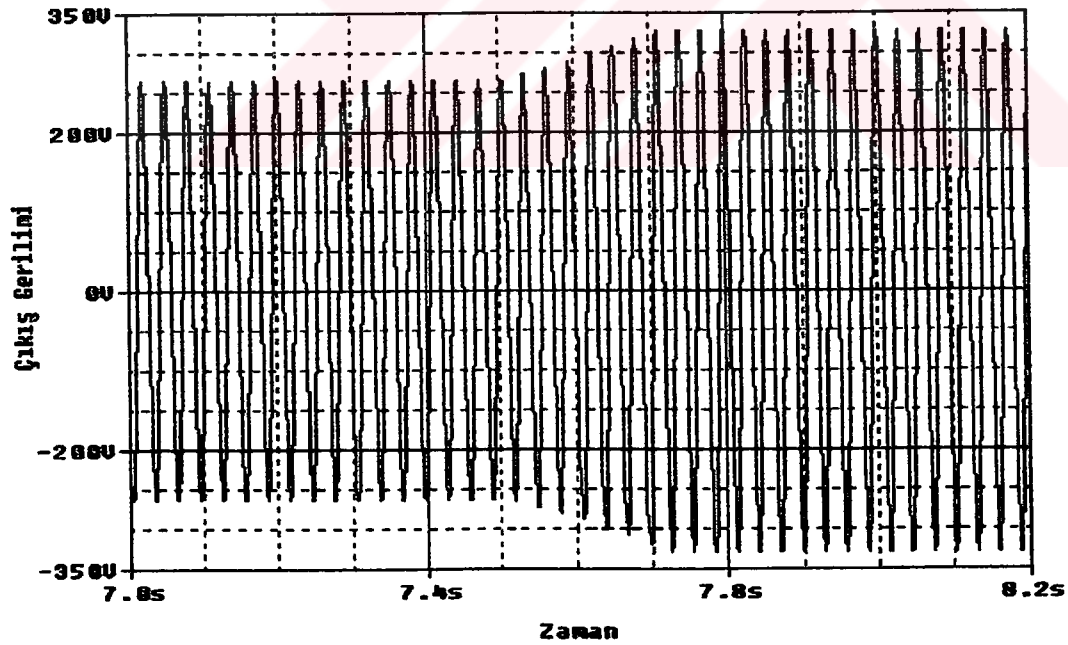


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.13 Tahrik hızının 1318 dev/dk' dan 1190 dev/dk' ya düşmesi durumunda 137 μ F' lık uyarıtım kondansatörü için uç geriliminin değişimi



a) Deney sonucu



b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.14 Tahrik hızının 1190 dev/dk' dan 1354 dev/dk' ya yükselmesi durumunda $137 \mu\text{F}$ ' lık uyartım kondansatörü için uç geriliminin değişimi

4.2.4 Asenkron Generatörün Uçlarına Yük İlave Edildiğinde Generatör Gerilimindeki Değişimler

Şekil 4.15' de $154 \mu\text{F}$ ' lık bir kondansatör ile uyartılan asenkron generatörün uçlarına 30Ω ' luk omik bir yük ilave edildiğinde generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Omik yük devreye alındığı zaman güç değeri düşecek ve generatörün ürettiği gerilimin değeri azalacaktır. Bu değişim generatörlerde istenilen bir durum değildir.

Şekil 4.16' da $154 \mu\text{F}$ ' lık bir kondansatör ile uyartılan asenkron generatörün uçlarına önceden alınmış olan 30Ω ' luk omik bir yükün çıkarılması durumunda generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Omik yükün çıkarılması ile generatörün ürettiği gerilimin değerinin arttığı alınan sonuçlardan gözlenmektedir.

Şekil 4.17' de yine $154 \mu\text{F}$ ' lık bir kondansatör ile uyartılan asenkron generatörün uçlarına 75Ω ' luk omik bir yük ilave edilmesi durumunda generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere yükün devreye alınması ile generatörün üretmiş olduğu gerilim düşmektedir.

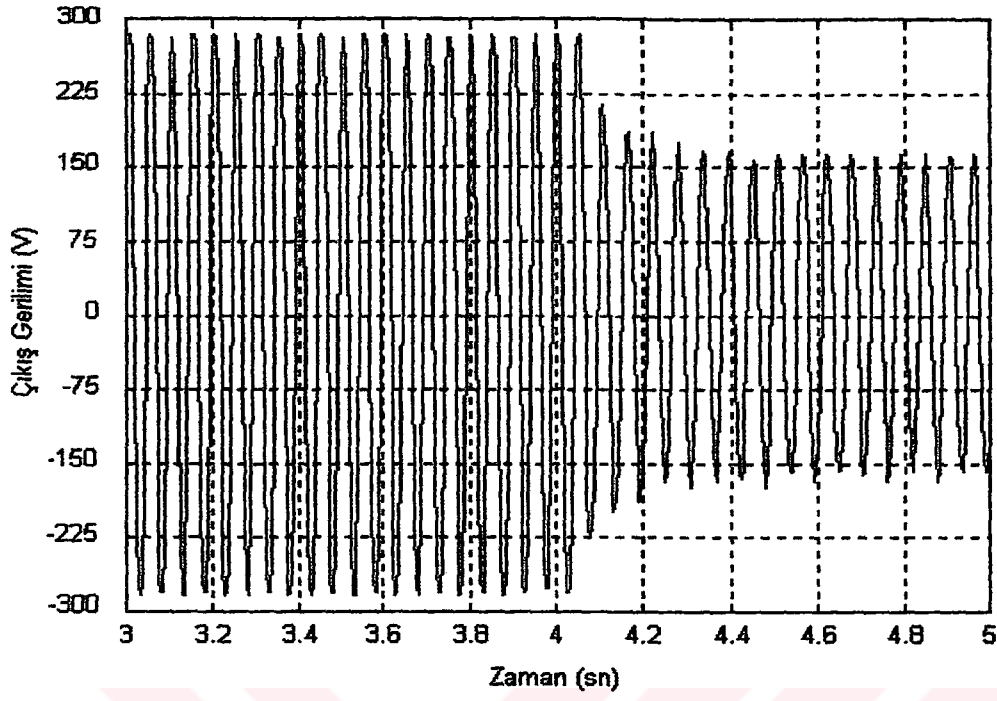
Şekil 4.18' de $154 \mu\text{F}$ ' lık bir kondansatör ile uyartılan asenkron generatörün uçlarına önceden alınmış olan 75Ω ' luk omik bir yükün çıkarılması durumunda generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Yükün çıkarılması ile generatörün ürettiği gerilimin değerinin arttığı alınan sonuçlardan gözlenmektedir.

Şekil 4.19 ve 4.21' de uyartım kondansatörü $171 \mu\text{F}$ iken asenkron generatörün uçlarına sırasıyla 30Ω ve 75Ω ' luk omik bir yükün ilave edilmesi durumunda generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan generatörün ürettiği gerilimin azaldığı görülmektedir.

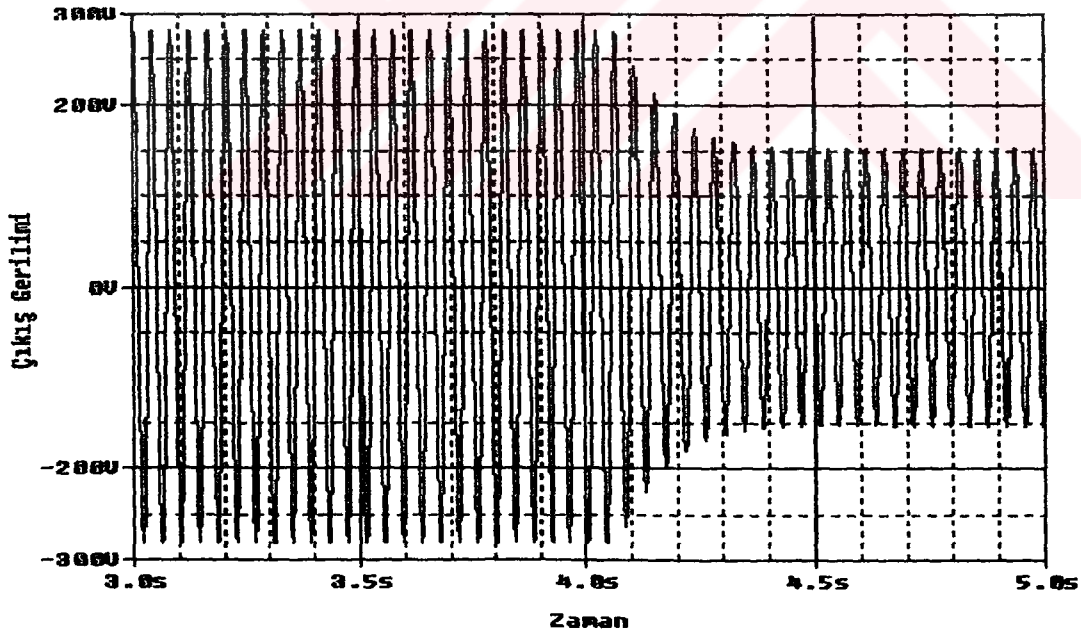
Şekil 4.20 ve 4.22' de ise $171 \mu\text{F}$ ' lık bir kondansatör ile uyartılan asenkron generatörün uçlarına önceden alınmış olan 30Ω ve 75Ω ' luk omik bir yükün çıkarılması durumunda generatörün ürettiği gerilimdeki değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları verilmiştir. Yükün çıkarılması ile generatörün ürettiği gerilimin değerinin arttığı alınan sonuçlardan gözlenmektedir.

Farklı kondansatör değerlerinde alınan bu sonuçlardan görüldüğü üzere, kondansatör değerinin artırılması generatörün ürettiği gerilimin değerini de yükseltmektedir. Dolayısıyla kondansatör değerinin değiştirilmesi generatörün farklı direnç aralıklarında yüklenebilmesi imkânını sağlar.



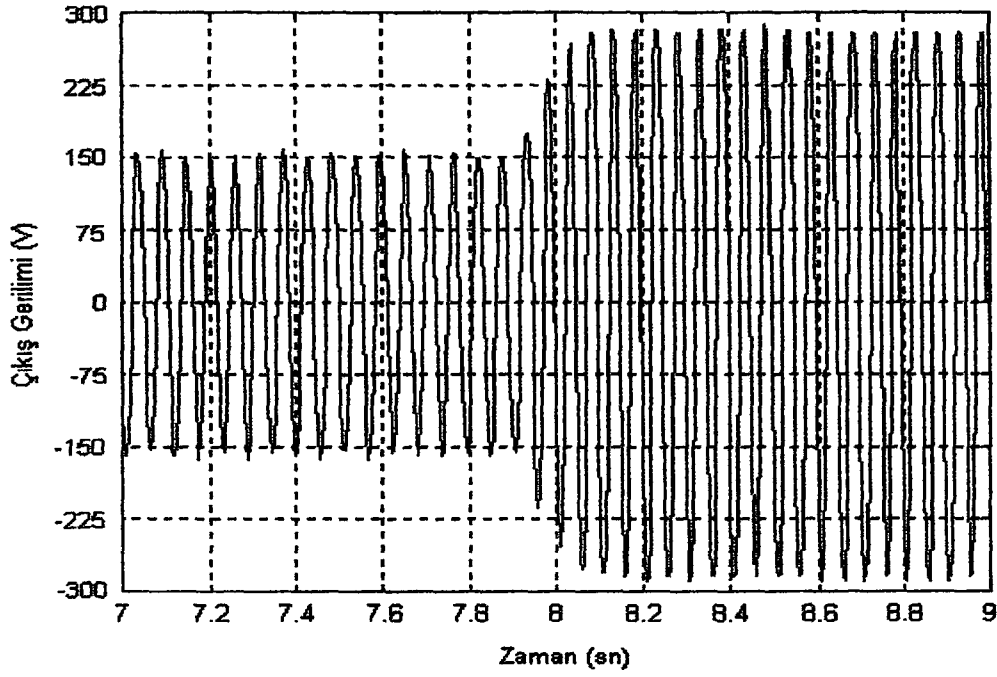


a) Deney sonucu

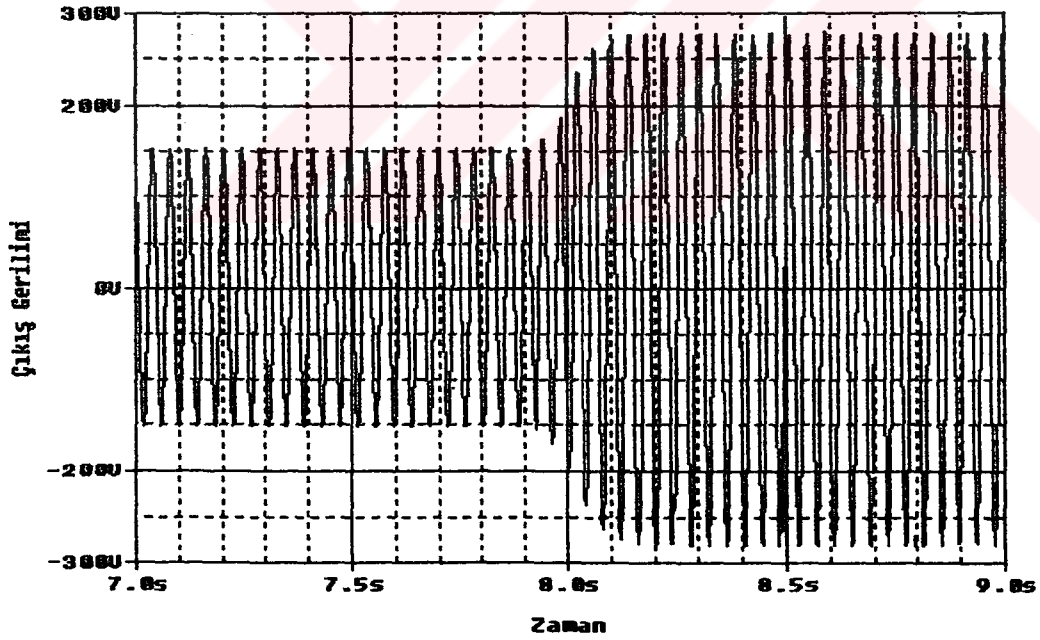


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.15 $154 \mu\text{F}$ 'lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 30Ω 'luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi

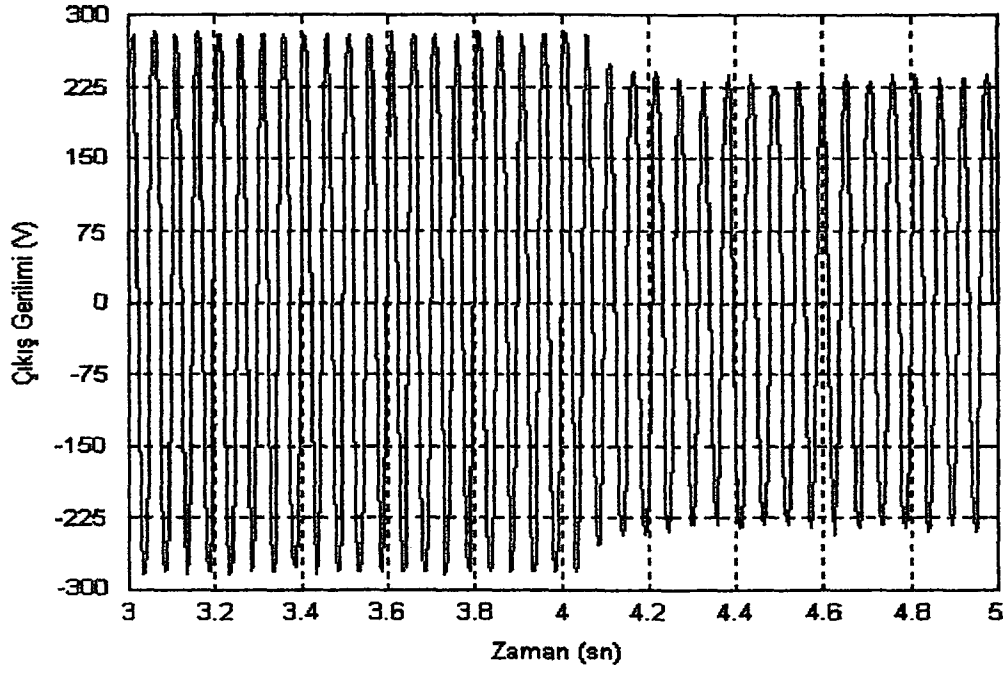


a) Deney sonucu

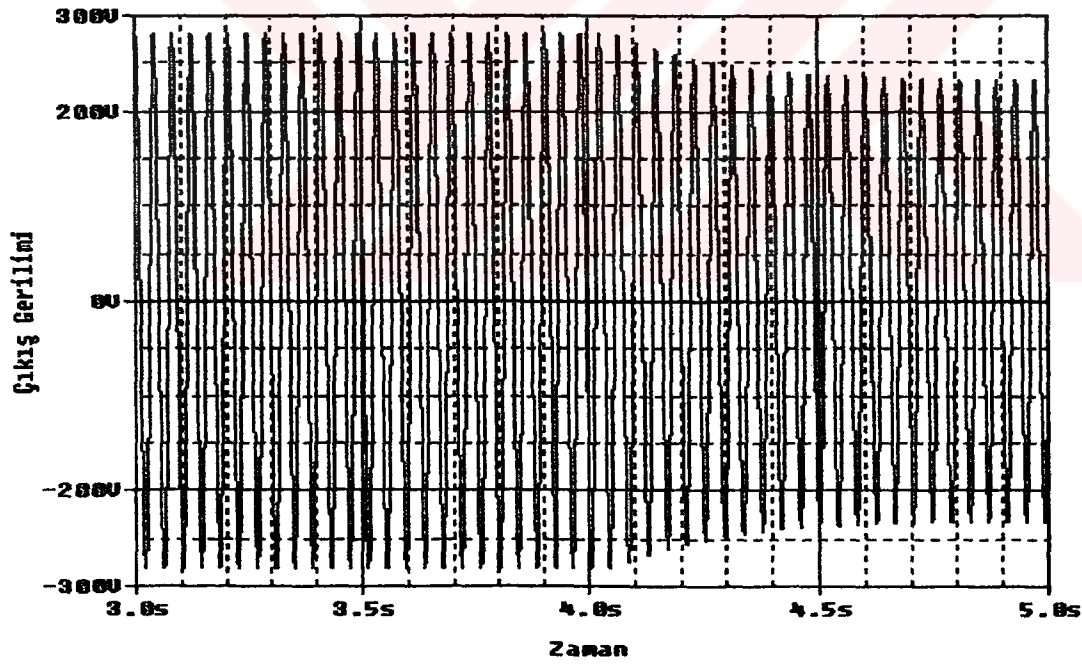


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.16 154 μF 'lık uyarım kondansatörüne sahip ve uçlarında 30 Ω 'luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi

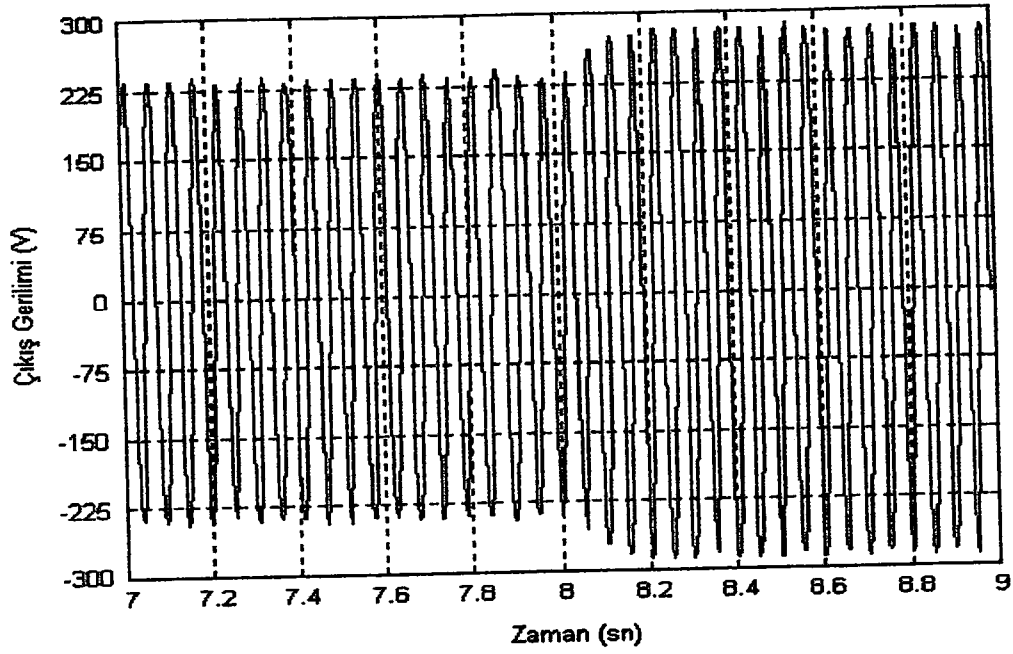


a) Deney sonucu

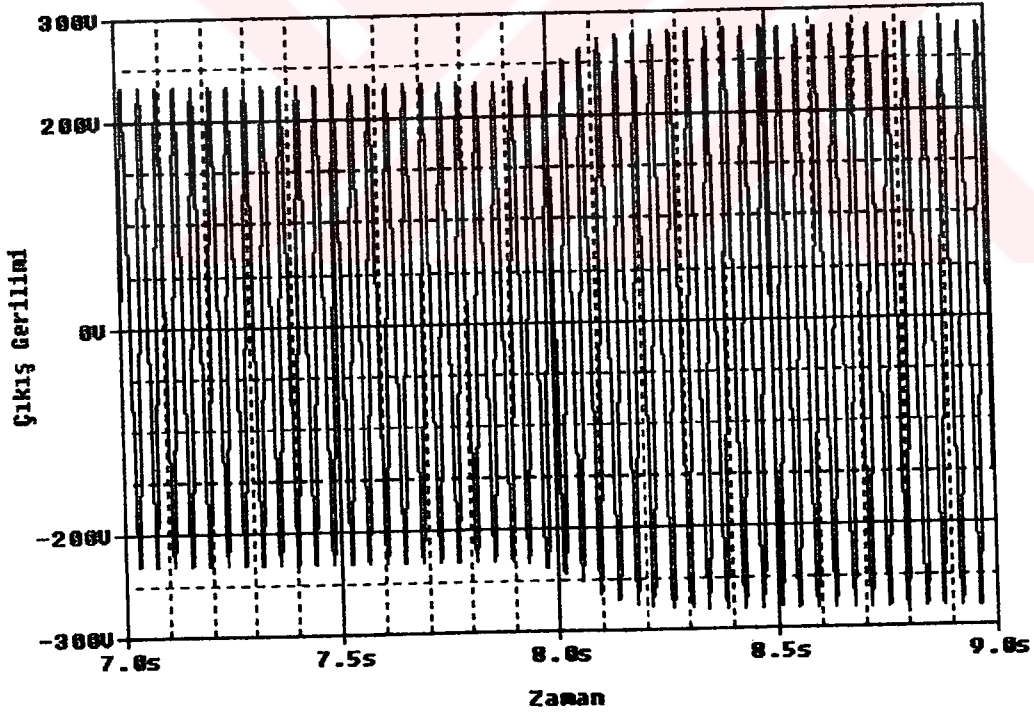


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.17 $154 \mu\text{F}$ 'lık uyarım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 75Ω 'luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi

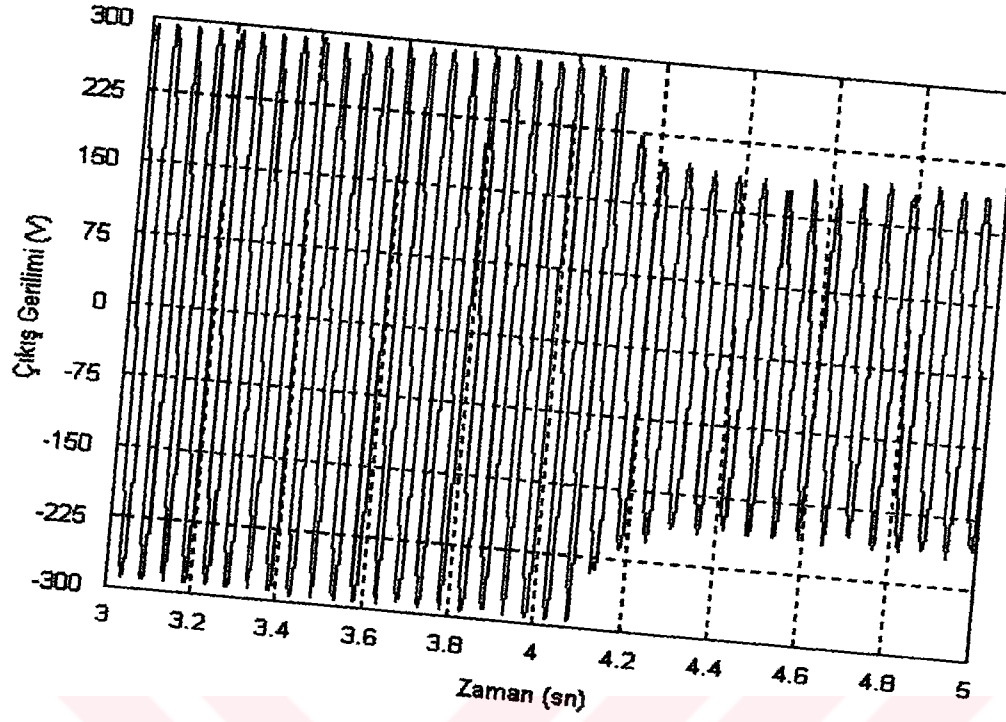


a) Deney sonucu

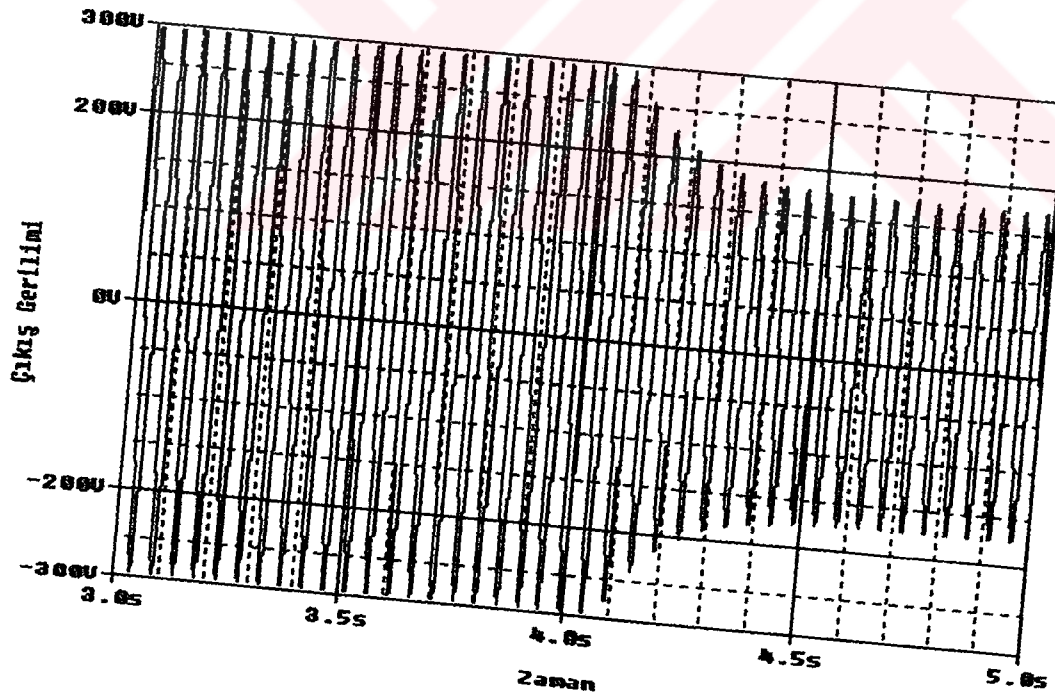


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.18 $154 \mu\text{F}$ 'lık uyarıtım kondansatörüne sahip ve uçlarında 75Ω 'luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi

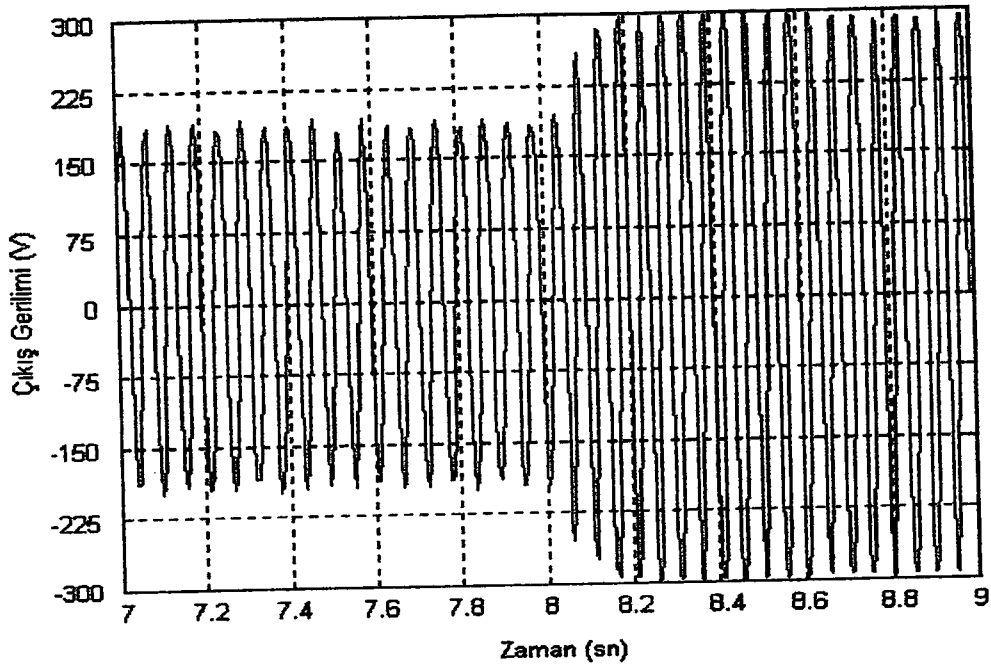


a) Deney sonucu

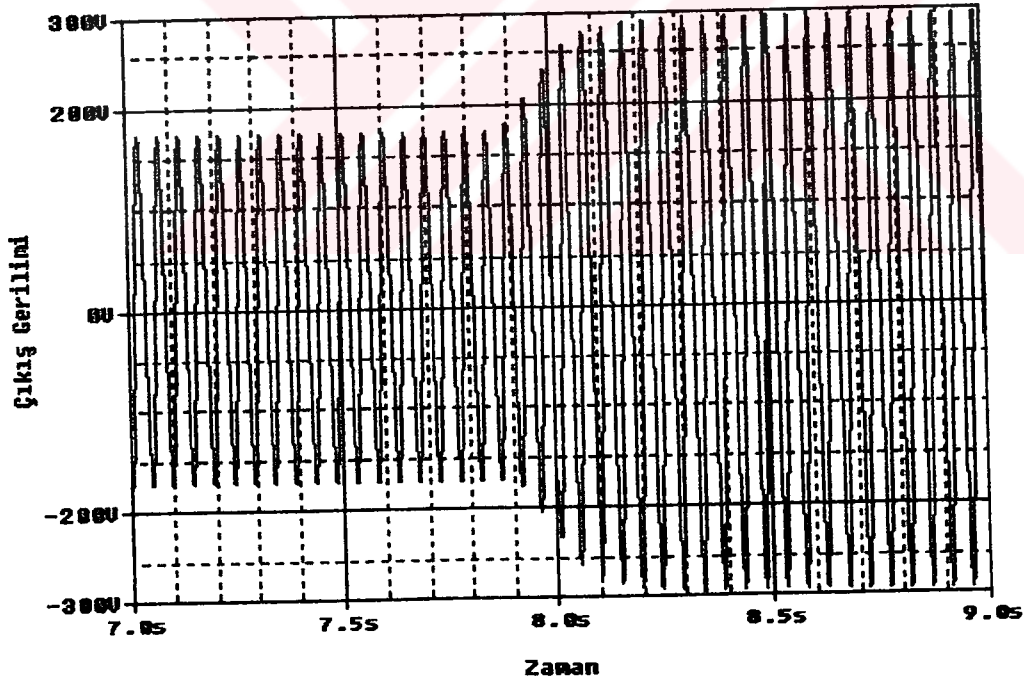


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.19 $171 \mu F$ 'lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 30Ω 'luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi

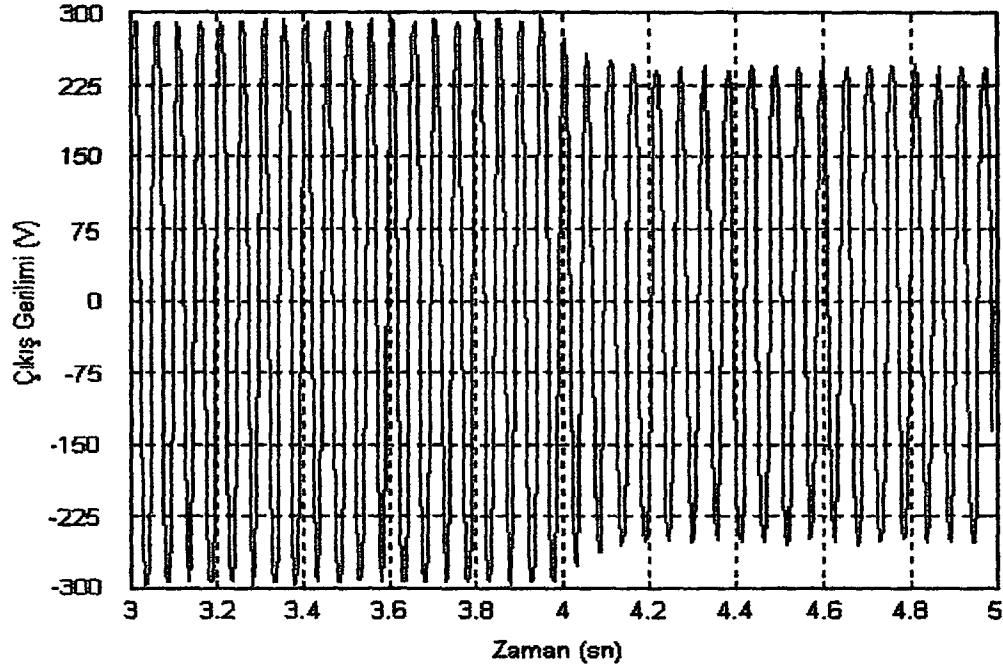


a) Deney sonucu

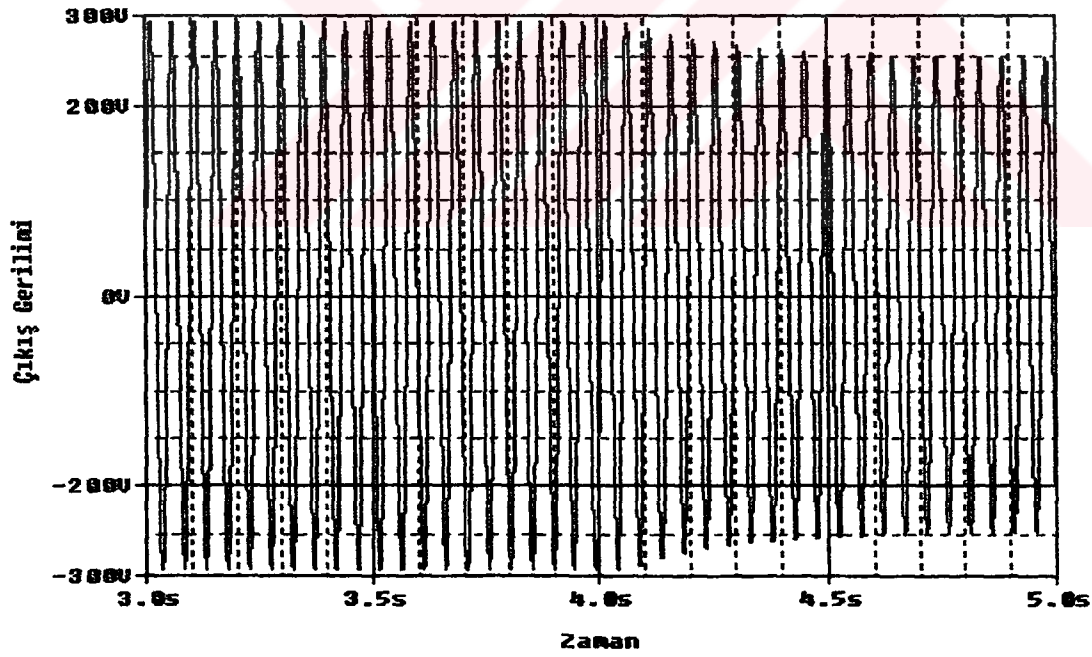


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.20 $171 \mu\text{F}$ ' luk uyartım kondansatörüne sahip ve uçlarında 30Ω ' luk omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi

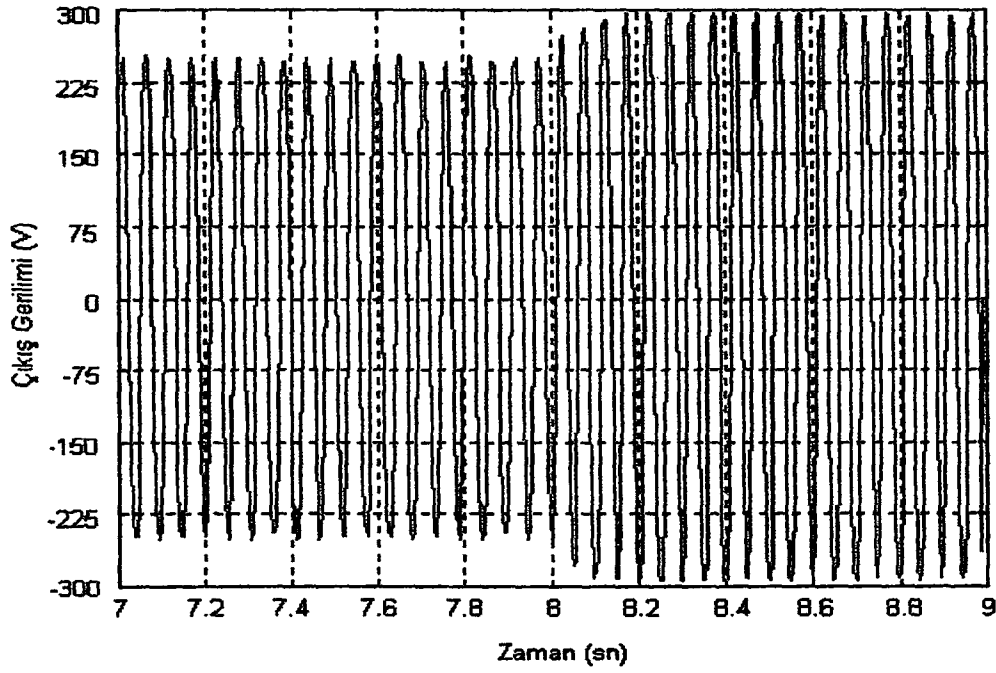


a) Deney sonucu

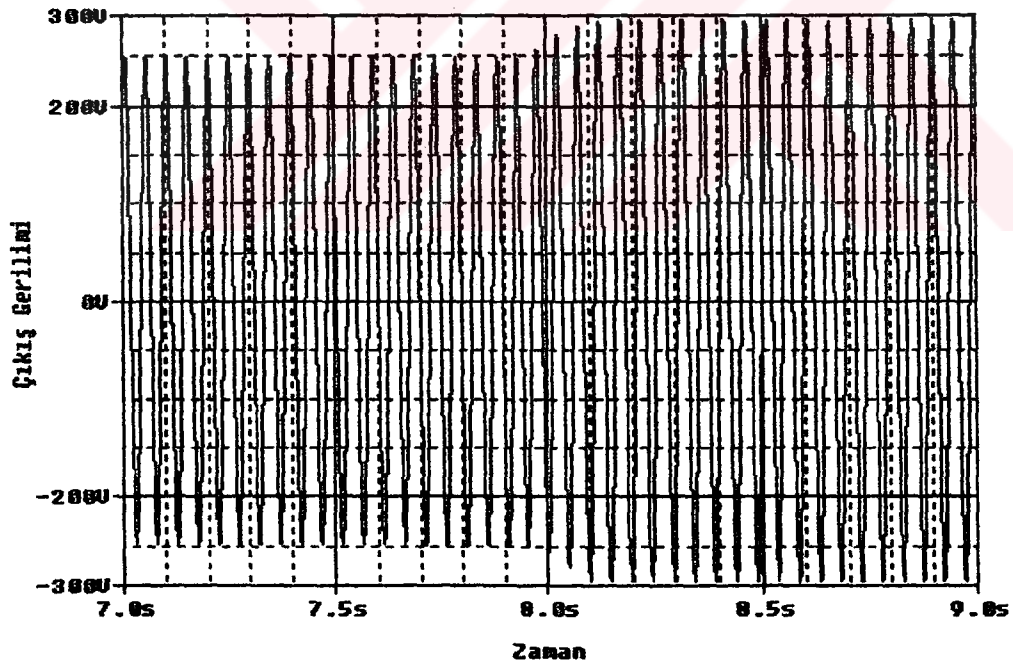


b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.21 $171 \mu F$ 'lık uyartım kondansatörüne sahip bir asenkron generatörün uçlarına 75Ω 'luk omik bir yük alınması durumunda uç geriliminin değişimi



a) Deney sonucu



b) Benzetim programı sonucu

Şekil 4.22 $171 \mu\text{F}$ 'lık uyartım kondansatörüne sahip ve uçlarında 75Ω 'lık omik bir yük bulunan asenkron generatörün uçlarındaki yükün çıkarılması durumunda uç geriliminin değişimi

4.3 Değerlendirme

Kendinden uyarımlı asenkron generatörün dinamik performansını incelemek amacıyla indüklenen gerilimler ve elektromekanik tanımlamaların benzetimi, tam devre modeliyle birleştirilerek ORCAD 9.0–PSPICE programına dayalı bir benzetim elde edilmiştir. Asenkron generatörün dinamik davranışının incelenebilmesi için değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar temelde birbirinin benzeri olup, birbirlerine göre çok farklı özelliklere sahip değillerdir.

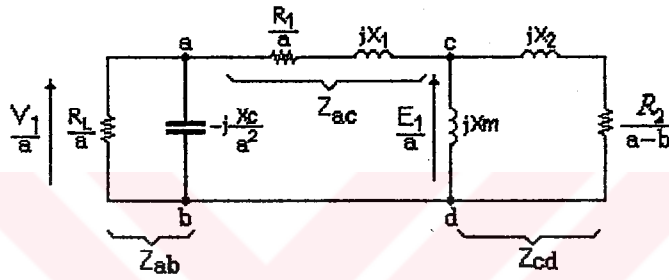
Asenkron generatörün kendi kendini uyarabilmesi için makinada bir artık mıknatısiyetin olması gerekmektedir. Bu olayı bilgisayar benzetiminde gösterebilmek için artık mıknatısiyete karşılık olarak mıknatıslanma akımına küçük bir değer verilmiştir. Böylece kendi kendini uyarma süreci teorik olarak gözlenebilmiştir.

Oluşturulan bu model sayesinde elde edilen benzetim sonuçları, osiloskobla ölçülen gerilim değişimlerine uygun çıkmıştır. Benzetimin doğruluğunu ve hassasiyetini gösteren bu sonuçların daha büyük yaklaşıklık sunması, sayısal çözümleme yöntemine, eşdeğer devre parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan yöntemlere ve ölçü aletlerinin hassasiyetine bağlıdır. Ayrıca bu modelde magnetik doyum, demir kayıpları ve sıcaklık etkisi ihmal edilmiştir.

5. UYARTIM İÇİN GEREKLİ MINİMUM KONDANSATÖR DEĞERİNİN HESAPLANMASI

5.1 Giriş

Burada, üç fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün gerilim üretebilmesi için ihtiyaç duyulan minimum kondansatör değerinin hesaplanması verilmiştir. Çözüm için asenkron makinanın eşdeğer devresinden faydalanılmaktadır.



Şekil 5.1 Kendinden uyarımlı asenkron generatörün bir faz için eşdeğer devresi

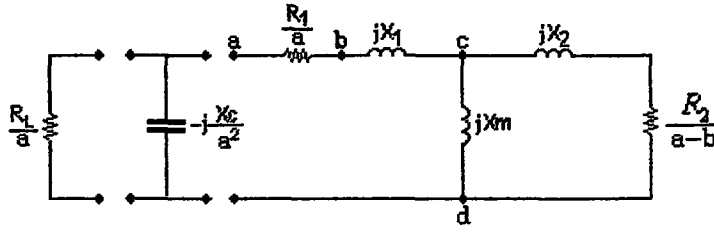
Kendinden uyarım için ihtiyaç duyulan kondansatör değerinin hesaplanması için çevre empedans metodundan faydalanılarak, abdca çevrimi içindeki eşdeğer empedansların toplamını sıfıra eşitleyelim ;

$$Z_{ab} + Z_{cd} + Z_{ac} = 0 \quad (5.1)$$

Daha sonra, yukarıdaki denklemde yer alan reel ve imajiner terimler sırasıyla sıfıra eşitlendiğinde , aşağıdaki eş zamanlı doğrusal olmayan denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} F(a, X_c) &= 0 \\ G(a, X_c) &= 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Bu denklemlerin çözdürülmesiyle gerekli olan a değeri ve a' nın yardımı ile de gerekli olan kapasite değeri hesaplanmaktadır (Chan, 1992).



Şekil 5.2 Asenkron generatörün bir faz için eşdeğer devresi

Eşdeğer devreyi bölgelere ayıracak olursak;

(1). bölge için (c ile d düğümleri arası):

$$\frac{R_2}{a-b} + j(X_2) \quad // \quad j.X_m \quad (5.3)$$

(2). bölge için (a ile c düğümleri arası):

$$\frac{R_1}{a} + j.X_1 \quad (5.4)$$

(3). bölge için (kondansatör kısmı):

$$-j.\frac{X_c}{a^2} \quad (5.5)$$

(4). bölge için (yük kısmı):

$$\frac{R_L}{a} \quad (5.6)$$

olur. Buna göre önce devrenin (1). bölgesinin paralel eşdeğeri alınacak olursa;

$$\frac{\left[\frac{R_2}{a-b} + j(X_2) \right] \cdot jX_m}{\frac{R_2}{a-b} + j[X_2 + X_m]} \quad (5.7)$$

elde edilir. Bu ifadenin eşleniği alınıp çıkan denklem düzenlenirse;

$$\frac{-X_2 \cdot X_m + j \cdot \frac{R_2 \cdot X_m}{a-b}}{\frac{R_2}{a-b} + j[X_2 + X_m]} \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow \frac{\left(-X_2 \cdot X_m + j \cdot \frac{R_2 \cdot X_m}{a-b} \right) \left(\frac{R_2}{a-b} - j(X_2 + X_m) \right)}{\left(\frac{R_2}{a-b} + j(X_2 + X_m) \right) \left(\frac{R_2}{a-b} - j(X_2 + X_m) \right)} \quad (5.9)$$

$$\Rightarrow \frac{-\frac{R_2 X_2 X_m}{(a-b)} + \frac{R_2 X_m (X_2 + X_m)}{(a-b)} + j \left[\frac{R_2^2 X_m}{(a-b)^2} + X_2 X_m (X_2 + X_m) \right]}{\frac{R_2^2}{(a-b)^2} + (X_2 + X_m)^2} \quad (5.10)$$

$$\Rightarrow \frac{\frac{R_2 X_m (X_2 + X_m - X_2)}{(a-b)} + j \left[\frac{R_2^2 X_m + X_2 X_m (a-b)^2 (X_2 + X_m)}{(a-b)^2} \right]}{\frac{R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2}{(a-b)^2}} \quad (5.11)$$

$$\Rightarrow \frac{R_2 X_m^2 (a-b) + j \left[R_2^2 X_m + X_2 X_m (a-b)^2 (X_2 + X_m) \right]}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2} \quad (5.12)$$

elde edilir. Bu denklem devrede c ile d noktaları arasındaki eşdeğer empedansı verir ve

$$Z_{cd} = R_{cd} + jX_{cd} \quad (5.13)$$

olarak ifade edilebilir. Buna göre; denklemin reel kısmı

$$R_{cd} = \frac{R_2 \cdot X_m^2 \cdot (a-b)}{R_2^2 + (a-b)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \quad (5.14)$$

ve imajiner kısmı

$$X_{cd} = \frac{[R_2^2 \cdot X_m + X_2 \cdot X_m \cdot (a-b)^2 \cdot (X_2 + X_m)]}{R_2^2 + (a-b)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \quad (5.15)$$

olur. Devrede a ile d noktaları arasındaki eşdeğer empedans

$$Z_{ad} = R_{ad} + j \cdot X_{ad} \quad (5.16)$$

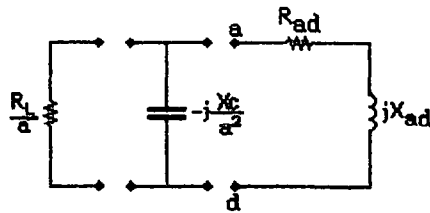
olup, burada; reel kısım

$$R_{ad} = \frac{R_1}{a} + R_{cd} \quad (5.17)$$

ve imajiner kısım

$$X_{ad} = X_1 + X_{cd} \quad (5.18)$$

olur. Buna göre eşdeğer devre Şekil 5.3' deki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.3 Basitleştirilmiş eşdeğer devre

Kirchhoff'un akımlar kanununa göre devrede

$$\frac{V_1}{a}(Y_L + Y_c + Y_{ad}) = 0 \quad (5.19)$$

olur. Burada oluşan çıkış gerilimi değeri $V_1 \neq 0$ olarak alınır ;

$$Y_L + Y_c + Y_{ad} = 0 \quad (5.20)$$

olacaktır. Burada,

$$Y_{ad} = \frac{1}{Z_{ad}} = \frac{1}{R_{ad} + jX_{ad}} \quad (5.21)$$

$$Y_c = j \cdot \frac{a^2}{X_c} \quad (5.22)$$

$$Y_L = \frac{a}{R_L} \quad (5.23)$$

olduğuna göre Denklem (5.20)

$$j \cdot \frac{a^2}{X_c} + \frac{a}{R_L} + \frac{1}{R_{ad} + jX_{ad}} = 0 \quad (5.24)$$

$$\Rightarrow j \cdot \frac{a^2}{X_c} + \frac{a}{R_L} + \frac{R_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} - j \cdot \frac{X_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.25)$$

olarak elde edilir. Bu denklemin; reel kısmı

$$\frac{a}{R_L} + \frac{R_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.26)$$

ve imajiner kısmı

$$\frac{a^2}{X_c} - \frac{X_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.27)$$

olur. Denklemin reel kısmından faydalanılarak gerekli olan a değeri bulunur ve bu değer ile denklemin imajiner kısmından gerekli olan C kapasite değeri hesaplanılır.

Buna göre reel kısımdan faydalanılarak gerekli olan a değerlerini hesaplayalım:

$$\frac{a}{R_L} + \frac{R_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.28)$$

$$\Rightarrow a(R_{ad}^2 + X_{ad}^2) + R_L R_{ad} = 0 \quad (5.29)$$

Burada;

$$R_{ad} = \frac{R_2 X_m^2 (a-b)}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2} + \frac{R_1}{a} \quad (5.30)$$

olup, düzenlenecek olursa;

$$R_{ad} = \frac{a(a-b)R_2 X_m^2 + R_1 (R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2)}{a(R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2)} \quad (5.31)$$

olur. Burada işlemleri kolaylaştırmak için;

$$R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2 = SSS1 \quad (5.32)$$

olarak alınırsa Denklem (5.31)

$$R_{ad} = \frac{a(a-b)R_2 X_m^2 + R_1 SSS1}{a.SSS1} \quad (5.33)$$

olur. Burada da;

$$a(a-b)R_2 X_m^2 + R_1 SSS1 = SSS2 \quad (5.34)$$

olarak alınırsa Denklem (5.33)

$$R_{ad} = \frac{SSS2}{a.SSS1} \quad (5.35)$$

olur. Aynı kısaltma işlemlerini X_{ad} için de yapacak olursak;

$$X_{ad} = \frac{[R_2^2 X_m + X_2 X_m (a-b)^2 (X_2 + X_m)]}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2} + X_1 \quad (5.36)$$

$$X_{ad} = \frac{X_m [R_2^2 + X_2 (a-b)^2 (X_2 + X_m)] + X_1 SSS1}{SSS1} \quad (5.37)$$

Burada;

$$X_m [R_2^2 + X_2 (a-b)^2 (X_2 + X_m)] + X_1 SSS1 = SSS3 \quad (5.38)$$

olarak alınırsa, Denklem (5.37)

$$X_{ad} = \frac{SSS3}{SSS1} \quad (5.39)$$

olur.

$$SSS1 = R_2^2 + (a-b)^2 (X_2 + X_m)^2 \quad (5.40)$$

$$= R_2^2 + (a^2 - 2ab + b^2)(X_2 + X_m)^2 \quad ; \quad (X_2 + X_m)^2 = X_3^2 \quad (5.41)$$

$$= a^2 X_3^2 - 2abX_3^2 + R_2^2 + b^2 X_3^2 \quad (5.42)$$

$$= a^2 f_2 - a f_1 + f_0 \quad (5.43)$$

$$\text{SSS2} = a(a-b)R_2 X_m^2 + R_1 \text{SSS1} \quad (5.44)$$

$$= a^2 R_2 X_m^2 - abR_2 X_m^2 + R_1 (a^2 f_2 - a f_1 + f_0) \quad (5.45)$$

$$= a^2 (R_2 X_m^2 + R_1 f_2) - a(bR_2 X_m^2 + R_1 f_1) + R_1 f_0 \quad (5.46)$$

$$= a^2 g_2 - a g_1 + g_0 \quad (5.47)$$

$$\text{SSS3} = X_m [R_2^2 + X_2 (a-b)^2 (X_2 + X_m)] + X_1 \text{SSS1} \quad (5.48)$$

$$= X_m R_2^2 + X_m X_2 X_3 (a^2 - 2ab + b^2) + X_1 (a^2 f_2 - a f_1 + f_0) \quad (5.49)$$

$$= X_m R_2^2 + a^2 X_m X_2 X_3 - 2abX_m X_2 X_3 + b^2 X_m X_2 X_3 + a^2 f_2 X_1 - a f_1 X_1 + f_0 X_1 \quad (5.50)$$

$$= a^2 (X_m X_2 X_3 + f_2 X_1) - a(2bX_m X_2 X_3 + f_1 X_1) + (X_m R_2^2 + b^2 X_m X_2 X_3 + f_0 X_1) \quad (5.51)$$

$$= a^2 h_2 - a h_1 + h_0 \quad (5.52)$$

$$a(R_{ad}^2 + X_{ad}^2) + R_L R_{ad} = 0 \quad (5.53)$$

olduğundan, yapılan kısaltmaları Denklem (5.53)' de yerine yazacak olursak ;

$$a \left(\left(\frac{SSS2}{a \cdot SSS1} \right)^2 + \left(\frac{SSS3}{SSS1} \right)^2 \right) + R_L \cdot \frac{SSS2}{a \cdot SSS1} = 0 \quad (5.54)$$

$$\Rightarrow a \left(\frac{SSS2^2 + a^2 \cdot SSS3^2}{a^2 \cdot SSS1^2} \right) + R_L \cdot \frac{SSS2}{a \cdot SSS1} = 0 \quad (5.55)$$

$$\Rightarrow SSS2^2 + a^2 \cdot SSS3^2 + R_L \cdot SSS1 \cdot SSS2 = 0 \quad (5.56)$$

$$\begin{aligned} & a^4 \cdot g_2^2 - 2 \cdot a^3 \cdot g_1 \cdot g_2 + a^2 \cdot (g_1^2 + 2 \cdot g_0 \cdot g_2) - 2 \cdot a \cdot g_0 \cdot g_1 + g_0^2 + a^6 \cdot h_2^2 \\ \Rightarrow & - 2 \cdot a^5 \cdot h_1 \cdot h_2 + a^4 \cdot (h_1^2 + 2 \cdot h_0 \cdot h_2) - 2 \cdot a^3 \cdot h_0 \cdot h_1 + a^2 \cdot h_0^2 + a^4 \cdot R_L \cdot g_2 \cdot f_2 \\ & - a^3 \cdot R_L \cdot (g_1 \cdot f_2 + g_2 \cdot f_1) + a^2 \cdot R_L \cdot (g_0 \cdot f_2 + g_1 \cdot f_1 + g_2 \cdot f_0) \\ & - a \cdot R_L \cdot (g_0 \cdot f_1 + g_1 \cdot f_0) + R_L \cdot g_0 \cdot f_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.57)$$

Buna göre Denklem (5.57)' yi

$$\begin{aligned} & a^6 \cdot h_2^2 \\ & + a^5 \cdot (-2 \cdot h_1 \cdot h_2) \\ & + a^4 \cdot (h_1^2 + 2 \cdot h_0 \cdot h_2 + g_2^2 + R_L \cdot g_2 \cdot f_2) \\ & + a^3 \cdot (-2 \cdot h_0 \cdot h_1 - R_L \cdot (g_1 \cdot f_2 + g_2 \cdot f_1) - 2 \cdot g_1 \cdot g_2) \\ & + a^2 \cdot (h_0^2 + R_L \cdot (g_0 \cdot f_2 + g_1 \cdot f_1 + g_2 \cdot f_0) + g_1^2 + 2 \cdot g_0 \cdot g_2) \\ & + a \cdot (-2 \cdot g_0 \cdot g_1 - R_L \cdot (g_0 \cdot f_1 + g_1 \cdot f_0)) \\ & + (g_0^2 + R_L \cdot g_0 \cdot f_0) = 0 \end{aligned} \quad (5.58)$$

olarak düzenleyebiliriz.

Reel kısmın sıfıra eşitlenip sadeleştirilmesiyle Denklem (5.58)' de açık hali bulunan;

$$p_6 \cdot a^6 + p_5 \cdot a^5 + p_4 \cdot a^4 + p_3 \cdot a^3 + p_2 \cdot a^2 + p_1 \cdot a + p_0 = 0 \quad (5.59)$$

şeklinde altıncı dereceden bir polinom elde edilir.

İmajiner kısım için verilen denklem ;

$$-\frac{X_{ad}}{R_{ad}^2 + X_{ad}^2} + \frac{a^2}{X_c} = 0 \quad (5.60)$$

olduğundan dolayı , bu eşitlikten X_c değeri ve dolayısıyla C değeri hesaplanabilir.

Buna göre ;

$$\Rightarrow -X_c \cdot X_{ad} + a^2 \cdot (R_{ad}^2 + X_{ad}^2) = 0 \quad (5.61)$$

$$\Rightarrow X_c = \frac{a^2 \cdot (R_{ad}^2 + X_{ad}^2)}{X_{ad}} \quad (5.62)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{a^2 \cdot (R_{ad}^2 + X_{ad}^2)}{X_{ad}} \quad (5.63)$$

$$\Rightarrow C = \frac{X_{ad}}{\omega \cdot a^2 \cdot (R_{ad}^2 + X_{ad}^2)} \quad (5.64)$$

ifadesi elde edilir.

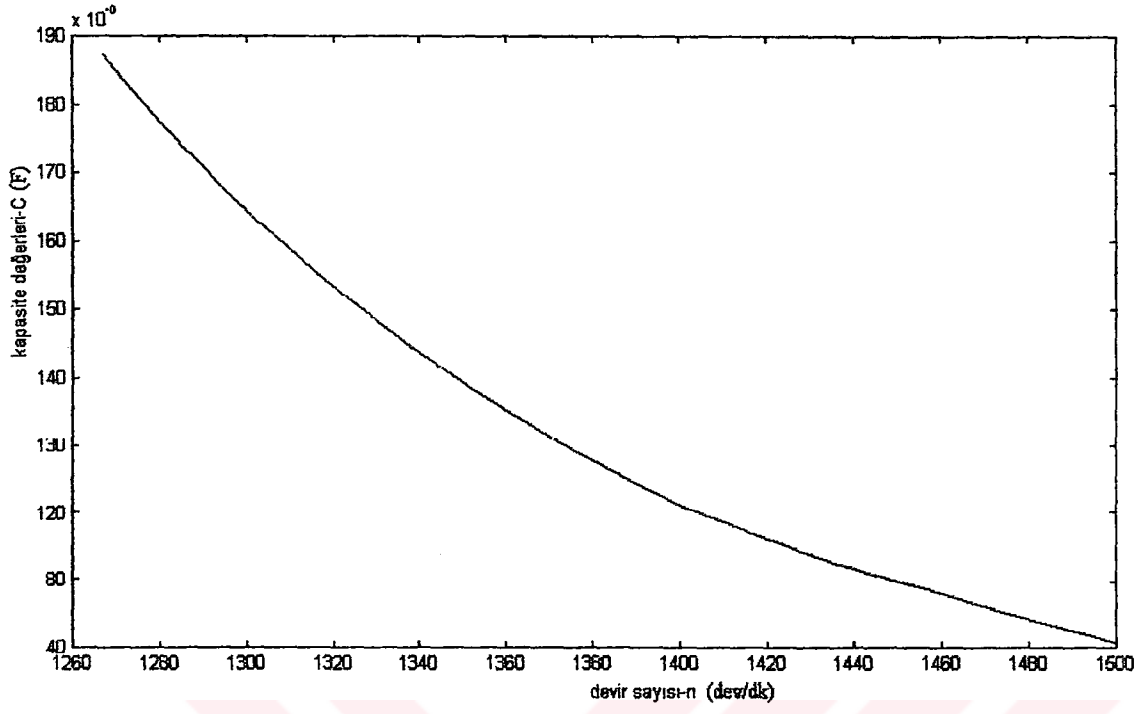
Reel kısımdan elde edilen Denklem (5.59)' daki altıncı dereceden polinomun sadece reel kökleri alınıp, imajiner kısımdan elde edilen Denklem (5.64)' de yerine konulursa uyartım için gerekli olan kapasite değeri bulunur. Reel köklerden maksimum (a_{max}) olanı alınıp Denklem (5.64)' de yerine konulursa uyartım için gerekli olan minimum kapasite değerini hesaplanır. Anılan bu denklemlerden faydalanılarak aşağıda parametreleri verilen asenkron makina için elde edilen kondansatör-hız/frekans değişimleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5' de verilmiştir.

Makina parametreleri;

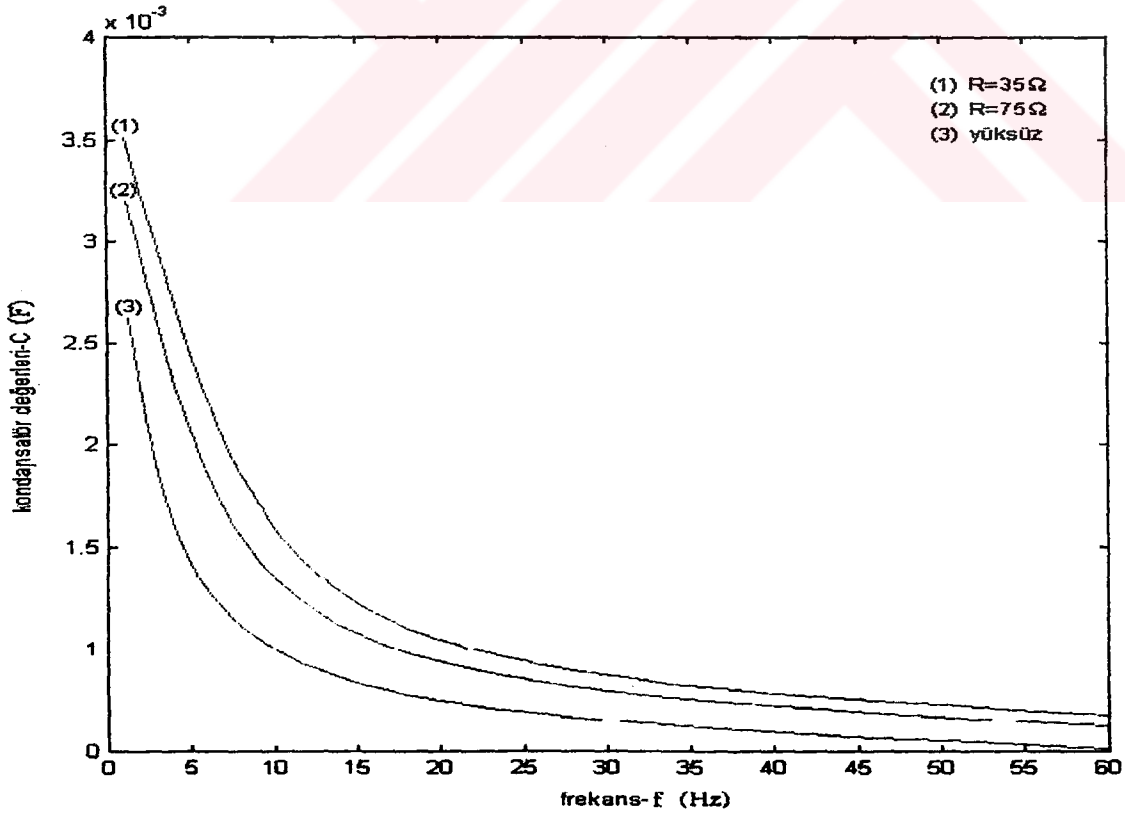
3 faz, 4 kutup, 50 Hz, 380 V, 9 A, 5.5 kW

$R_1 = 1.232$ $R_2 = 2.226$ $X_m = 42.245$

$X_{\sigma s} = 1.9215$ $X_{\sigma r} = 1.9215$



Şekil 5.4 Kondansatör değeri-Hız eğrisinin değişimi



Şekil 5.5 Kondansatör değeri-Frekans değeri değişimi

6. UYARTIM KONDANSATÖRÜNÜN ANAHTARLANMASI

6.1 Giriş

Asenkron generatör yüklendiğinde meydana gelen değişimlerin deneysel ve benzetim sonuçları Bölüm 4.2.4' de verilmiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü gibi generatör uçlarındaki gerilim, yükün değerine bağlı olarak azalmaktadır. Generatörlerde üretilen gerilimin genlik değerinin değişmesi istenilmez. Bunun için her yük durumunda generatörün ürettiği gerilimi ayarlamak gerekir.

Asenkron generatörlerde üretilen gerilimin değeri, tahrik hızı ve uyartım için dışarıdan bağlanan kondansatörlerin kapasite değerlerine bağlıdır. Dolayısıyla yüke bağlı olarak gerilimde meydana gelecek değişimler ya tahrik sisteminin kontrolü ya da uyartım için bağlanan kondansatörlerin kapasitelerinin kontrolü ile engellenebilir. Tahrik sisteminin kontrolü ile hızın değiştirilmesi generatörün ürettiği gerilimin frekansını etkileyecektir. Bu nedenle gerilimin kontrolü için uyartım kondansatörünün kontrol edilmesi daha uygun olacaktır.

Uyartım kondansatörünün değerinin artırılması durumunda generatörün uç geriliminin yükseldiği Bölüm 4.2.2' de verilen deneysel ve benzetim sonuçlarından görülmüştü. Eğer yükün değerine karşın, uyartım kondansatörünün değeri uygun şekilde değiştirilecek olursa, yükten dolayı gerilimde oluşacak değişimler engellenebilir.

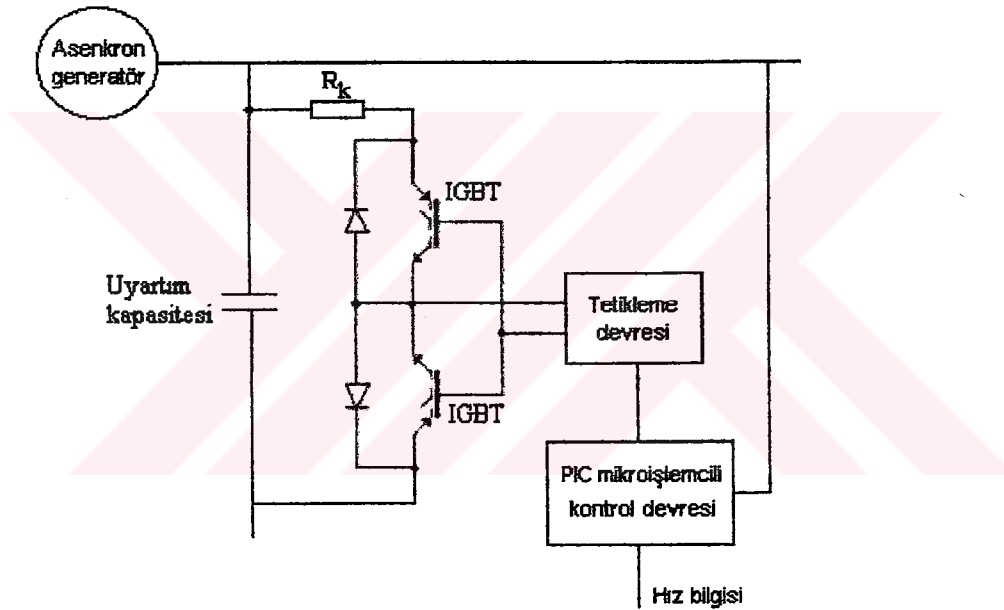
Yüke bağımlı olarak gerilimde meydana gelebilecek değişimleri engelleyebilmek için yukarıda bahsedildiği gibi ya uyartım kondansatörüne yeni kondansatörler eklemeli yada uyartım kondansatörü anahtarlanarak, etkin kapasite değeri değiştirilmelidir. Uyartım kondansatörünün reaktansı;

$$X_C = \frac{1}{2\pi f.C} \quad (6.1)$$

dir. Kondansatörün anahtarlanması ile uyartım kondansatörünün frekans değeri ve buna bağlı olarak da kondansatörün reaktans değeri değişecektir. Reaktansta meydana gelecek bu değişim ile de asenkron generatörün mıknatıslanma akımının değeri

değişecektir. Böylece yük değişimlerinde generatör uç gerilimini sabit tutacak mıknatıslanma akım gereksinimi, kondansatörün anahtarlanmasıyla sağlanacaktır.

Gerekli anahtarlama frekansının bulunması için, Bölüm 5' de verilen, üç fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif akımı karşılayabilmek için gerekli olan kondansatör değerinin hesaplanabilmesine ilişkin bir algoritmadan faydalanılmıştır. Bu algoritma sayesinde elde edilen Şekil-5.5' deki değişimlerden, değişik yük ve hız durumlarında gerekli olan mıknatıslanma akımını sağlayacak kondansatör değerleri hesaplanmakta ve bu değeri sağlayacak anahtarlama frekansı bulunarak, uyarım kondansatörleri anahtarlanmaktadır.



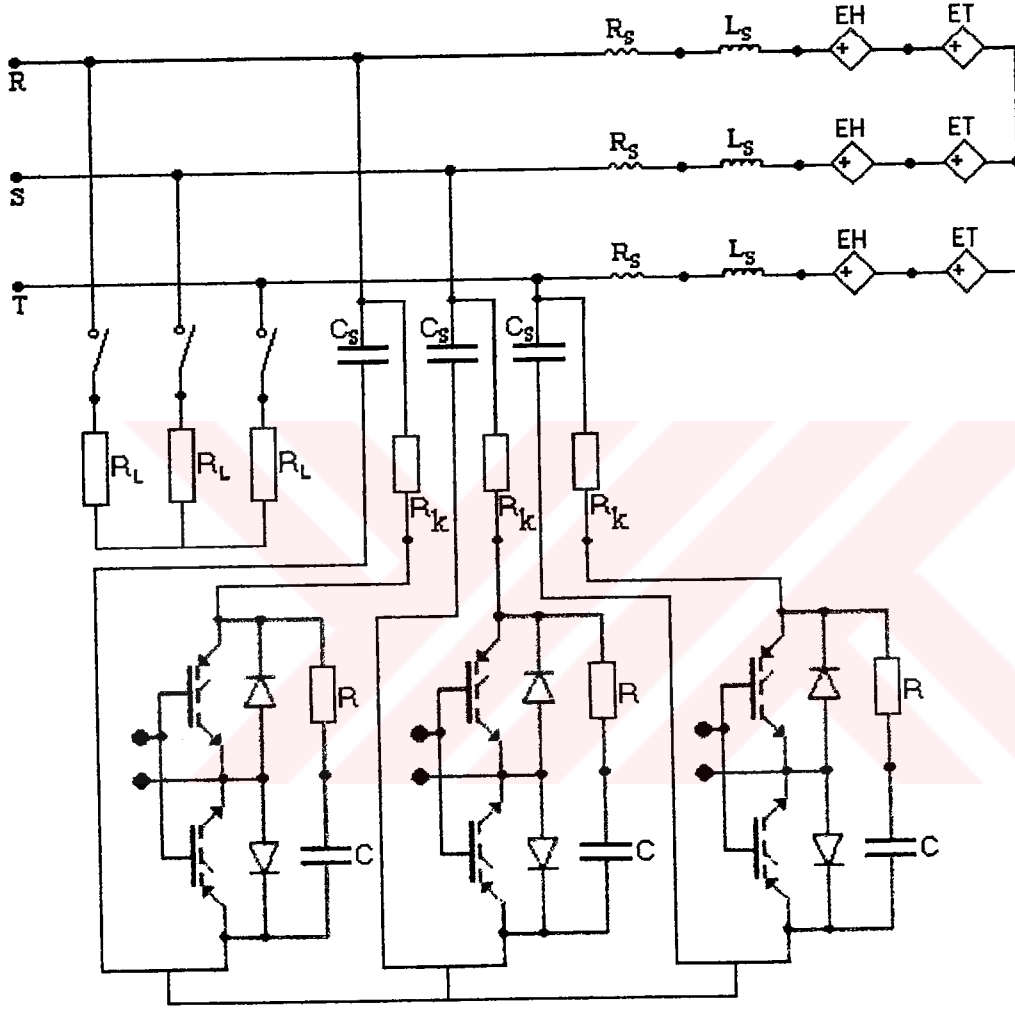
Şekil 6.1 Asenkron generatörün uç geriliminin kontrolü için gerçekleştirilecek devrenin blok diyagramı

6.2 PSPICE Modeli ve Teorik Sonuçlar

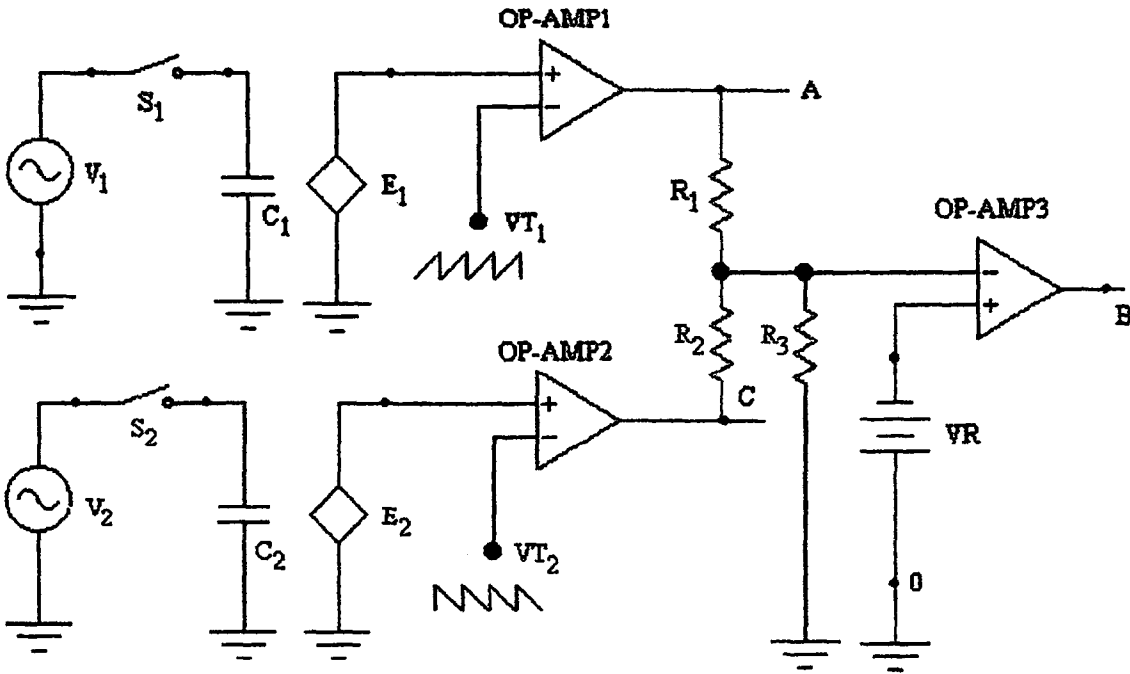
Asenkron generatör için oluşturulan PSPICE modeli Bölüm 4' de verilmişti. Uyarım kondansatörünün anahtarlanması durumunun teorik olarak gözlenebilmesi için bu modelden faydalanılabilir. Bu modelde uyarım için bağlanan kondansatörlere paralel olarak anahtarlar yerleştirip bu anahtarların kontrolü ile uyarım

kondansatörlerinin frekansının değiştirilmesi sağlanabilir ve bu durumda da yüke göre gerilimde meydana gelecek değişimler gözlemlenebilir.

Anahtarların yerleştirilmesi durumunda oluşacak yeni PSPICE modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.2 Uyarım kondansatörünün anahtarlanması durumunda asenkron generatörün stator eşdeğeri

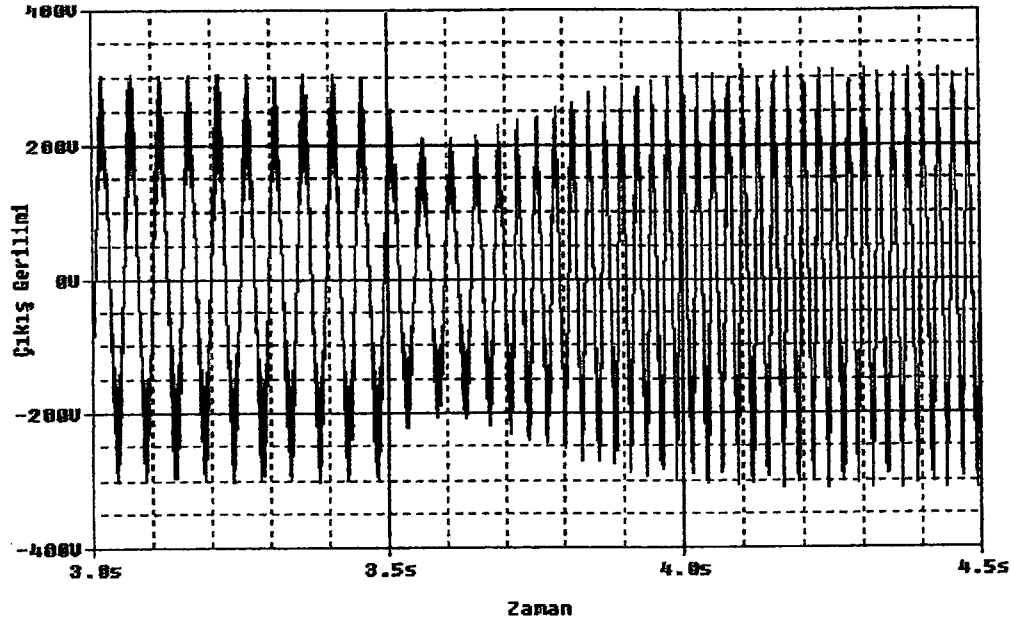


Şekil 6.3 Çift yönlü anahtarların kontrol işaretlerini üreten devre

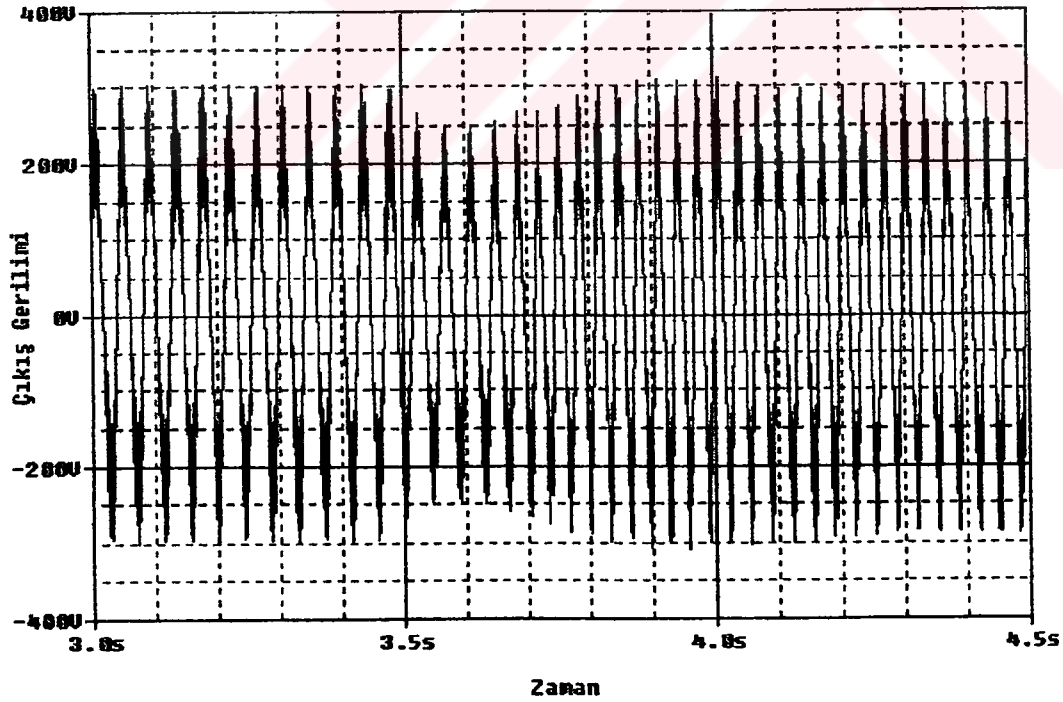
Modelde kondansatörlerin anahtarlanması için IGBT'lerden oluşmuş çift yönlü anahtarlar kullanılmıştır. Çift yönlü anahtar yapısında kullanılan iki adet IGBT, IRG4BC20UD isimli 600V 13A 10 – 75 kHz değerli ve diyod ise fast recovery diyod olup 52A maksimum ileri yön akımına 1.7V maksimum ileri yön gerilim düşümüne ve maksimum 55ms geri düzelme zamanı özelliklerine sahiptir. IRG4BC20UD' nin iç yapısında diyod olduğundan, çift yönlü anahtar yapısındaki diyodun devrede kullanımına ve modellenmesine gerek kalmamıştır. IGBT'lerin anti seri bağlantılarının kodlanması ve IRG4BC20UD' nin üretici firma tarafından sağlanan PSPICE modellerinde bir alt devre olarak modele eklenmesi yeterlidir.

Her bir kolundaki çift yönlü anahtarla birlikte, kapanma anlarında oluşan yüksek gerilim piklerinden devreyi korumak için R-C' den oluşan snubber devresi kullanılır. R-C' den oluşan snubber devresi diğer snubber devreleri ile karşılaştırıldığında dezavantajları olmasına rağmen devrenin karmaşıklığını azaltmak için tercih edilir.

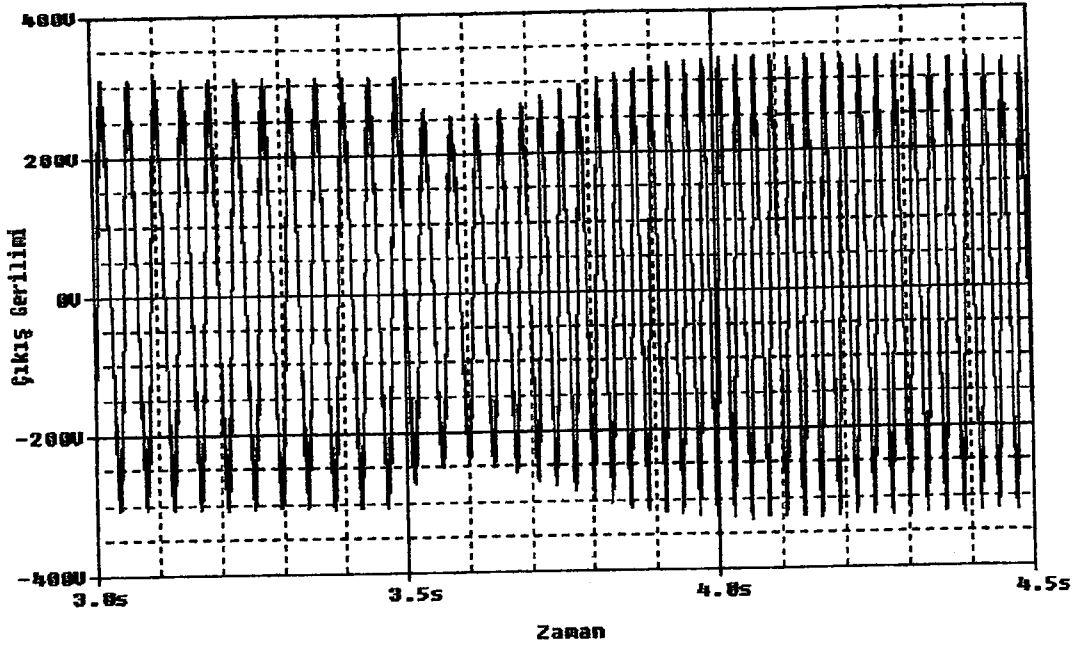
Oluşturulan yeni modelle değişik yük değerleri için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 6.4-6.7' de verilmiştir.



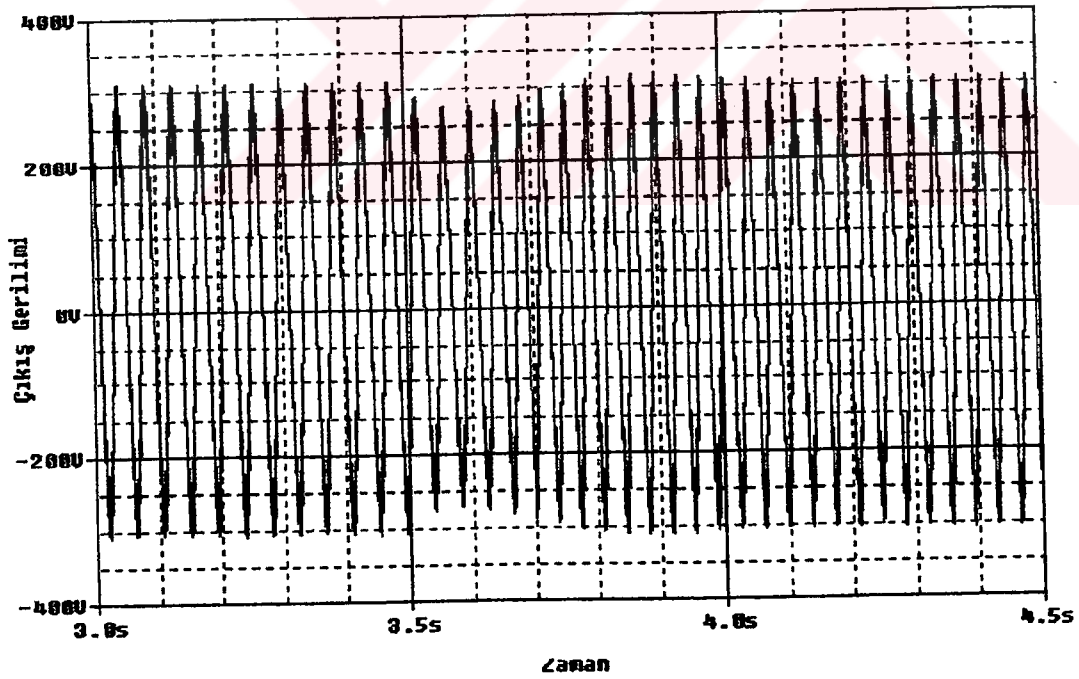
Şekil 6.4 96 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=364\mu\text{F}$)



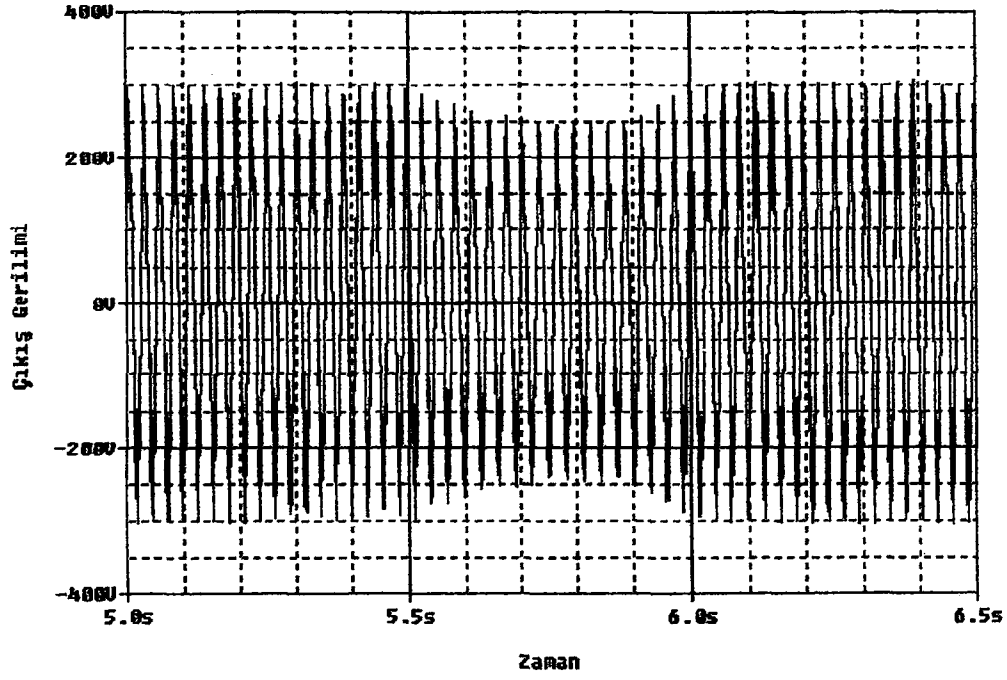
Şekil 6.5 70 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75 Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=278\mu\text{F}$)



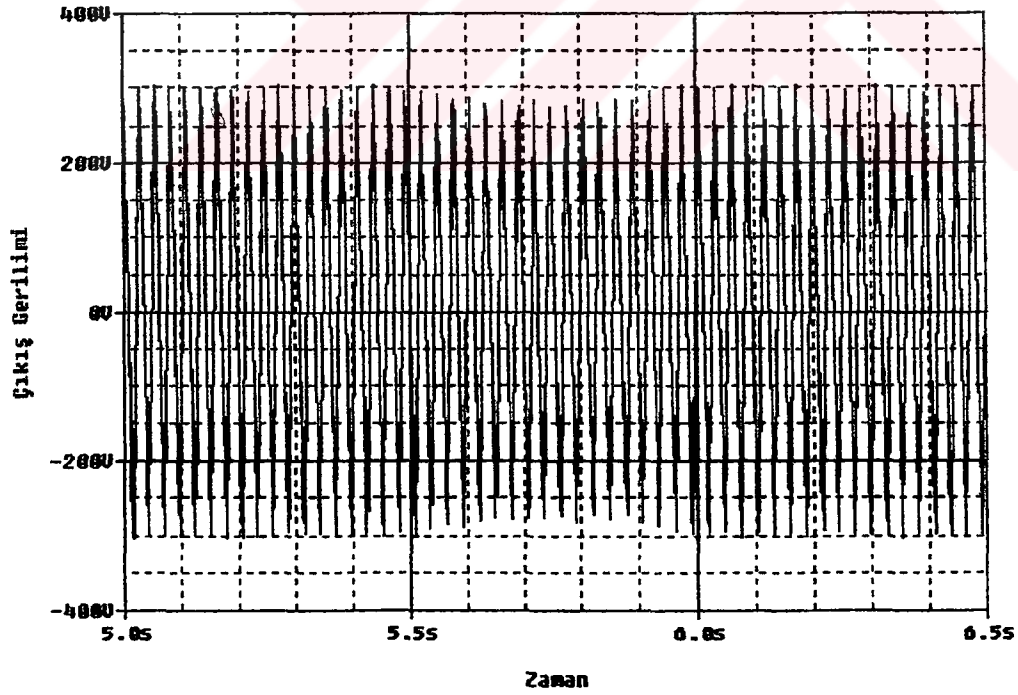
Şekil 6.6 85 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=171\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=358\mu\text{F}$)



Şekil 6.7 66 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=171\mu\text{F}$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=275\mu\text{F}$)



Şekil 6.8 Tahrir hızının 1380 dev/dk' dan 1280 dev/dk' ya düşmesi durumunda, 102 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 30Ω ' luk omik yük için generatör geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu F$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=372\mu F$)



Şekil 6.9 Tahrir hızının 1380 dev/dk'dan 1280 dev/dk' ya düşmesi durumunda, 74 Hz' lik anahtarlama frekansı ve 75Ω ' luk omik yük için generatör uç geriliminin değişimi (uyartım kondansatörünün değeri $C=154\mu F$, karşılık gelen kondansatör değeri $C=284\mu F$)

Bölüm 4.2.4' de asenkron generatörün dirençle yüklenmesi durumunda geriliminde meydana gelen değişimin deneysel ve benzetim sonuçları verilmişti. Burada gerilimin seviyesinin korunabilmesi için herhangi bir önlem alınmadığından generatörün geriliminin yüklendikten sonra azaldığı gözlenmiştir. Gerilimdeki bu değişimleri önlemek için uyarım kondansatörlerinin anahtarlanması ile elde edilen benzetim sonuçları Şekil 6.4-6.9' da verilmiştir. Şekil 6.4' de 154 μF ' lık kondansatörle uyarılan bir asenkron generatör 3.5 saniye sonra 30 Ω ' luk dirençle yüklenmiştir. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 96 Hz' lik frekans ile anahtarlanmaya başlanması sonucu gerilimin 0.4 saniye sonra eski seviyesine ulaşması sağlanmıştır. Şekil 6.5' de ise 154 μF ' lık kondansatörle uyarılan bir asenkron generatör 3.5 saniye sonra 75 Ω ' luk dirençle yüklenmiştir. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 70 Hz' lik frekansla anahtarlanması sonucu generatör geriliminin yaklaşık olarak 0.3 saniye sonra eski seviyesine ulaştığı görülmüştür. Şekil 6.6' de 171 μF ' lık kondansatörle uyarılan bir asenkron generatör 3.5 saniye sonra 30 Ω ' luk dirençle yüklenmiştir. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 85 Hz' lik frekans ile anahtarlanmaya başlanması sonucu gerilimin 0.5 saniye sonra eski seviyesine ulaşması sağlanmıştır. Şekil 6.7' de ise 171 μF ' lık kondansatörle uyarılan bir asenkron generatör 3.5 saniye sonra 75 Ω ' luk dirençle yüklenmiştir. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 66 Hz' lik frekansla anahtarlanması sonucu generatör geriliminin yaklaşık olarak 0.3 saniye sonra eski seviyesine ulaştığı görülmüştür. Şekil 6.8' de 154 μF ' lık kondansatörle uyarılan ve uçlarında 30 Ω ' luk bir yük bulunan asenkron generatörün hızı 5.5 saniye sonra 1380 dev/dk' dan 1280 dev/dk' ya düşmüştür. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 102 Hz' lik frekans ile anahtarlanmaya başlanması sonucu gerilimin 0.52 saniye sonra eski seviyesine ulaşması sağlanmıştır. Şekil 6.9' da 154 μF ' lık kondansatörle uyarılan ve uçlarında 75 Ω ' luk bir yük bulunan asenkron generatörün hızı 5.5 saniye sonra 1380 dev/dk' dan 1280 dev/dk' ya düşmüştür. Bu anda uyarım kondansatörlerinin 74 Hz' lik frekansla anahtarlanması sonucu generatör geriliminin yaklaşık olarak 0.46 saniye sonra eski seviyesine ulaştığı görülmüştür.

Bu sonuçlardan görüldüğü gibi devreye yük alınması ve hızın değişmesi durumunda uyarım kondansatörünün belirlenen frekanslarda anahtarlanması ile uç gerilim seviyesinin korunması sağlanmıştır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün dinamik durum davranışının incelenmesi için ve yük değişimleri karşısında generatörün uç gerilim değerinin korunmasını sağlamak için iki farklı PSPICE modeli sunulmuştur. Ayrıca bu modellerde kullanılmak üzere, asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif mıknatıslanma akımını karşılayabilmek için gerekli olan kondansatör değerinin hesaplanabilmesine ilişkin bir algoritma da verilmiştir.

Birinci model için, önce, asenkron generatörün faz değişkenleri model yaklaşımı ile matematiksel modeli elde edilmiştir. Daha sonra, bu matematiksel modele göre PSPICE paket programında uygun devreler kurularak benzetim modeli oluşturulmuş ve asenkron generatörün temel parametreleri olan uyarım kondansatörü, tahrik hızı ve yük değişimine göre generatörün uç gerilimdeki değişimin sonuçları alınmıştır. Asenkron generatörün deneysel olarak kurulan devresinden aynı değişimler için sonuçlar osiloskop vasıtasıyla alınarak, deney sonuçları ile benzetim programı sonuçları kıyaslanabilmektedir. Bu sayede benzetim programının doğruluğu hakkında yorum yapılabilmektedir.

İkinci modelde ise, generatörlerde yük değişimlerinden dolayı uç gerilimlerinde meydana gelecek değişimleri engelleyebilmek için, önceden kurulmuş olan modelden faydalanarak yeni bir benzetim modeli hazırlanmıştır. Bu modelde uyarım kondansatörleri çift yönlü IGBT' ler vasıtasıyla anahtarlanamakta ve buna bağlı olarak generatörün uyarma akımı kontrol edilebilmektedir. Bu model sayesinde elde edilen teorik sonuçlardan, generatörün geriliminde oluşacak değişimler karşısında IGBT' lerin anahtarlama frekanslarının uygun oranda değiştirilmesiyle uç gerilimindeki değişimlerin engellenebileceği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada, üç fazlı kendinden uyarımlı asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif akımı karşılayabilmek için gerekli olan kondansatör değerinin hesaplanabilmesine ilişkin bir algoritma da verilmiştir. Bunun için asenkron generatörün sürekli durumdaki bir fazına ilişkin eşdeğer devresinden faydalanılmıştır. Bu algoritma sayesinde değişik yük ve hız durumlarında gerekli olan mıknatıslanma akımını sağlayacak kondansatör değerleri hesaplanmaktadır. Bu nedenle bu ifade

kondansatör değer tespiti ve çalışma aralıklarındaki kondansatör ihtiyaının belirlenmesi açısından öneme sahiptir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için aşağıdaki hususlar önerilebilir:

Asenkron generatör için oluşturulan modelde magnetik doyma ihmal edilmiştir. Magnetik doymanın etkisi hesaba katılabilirse teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların daha yaklaşık değerler vermesi mümkün hale gelebilir.

Generatör geriliminde meydana gelebilecek değişimleri engelleyebilmek için geliřtirilen model temel alınarak pratik bir uygulama devresi gerekleřtirilebilir.



KAYNAKLAR

ABDEL-HALIM, M. A., SHALTOUT, A. A., (1995), **Solid-State Control of a Wind-Driven Self-Excited Induction Generator**, Electric Machines and Power Systems, 23:571-582

AL-BAHRANI, A. H., (1996), **Analysis of Self-Excited Induction Generators Under Unbalanced Conditions**, Electric Machines and Power Systems, 24:117-129

AL-JABRI, A., (1990), **Direct Evaluation for The Output Frequency and The Magnetizing Reactance of Three-Phase Isolated Self-Excited Induction Generators**, Electric Machines and Power Systems, 18:113-121

ALOLAH, A. L., ALKANHAL, M. A., (2000), **Optimization-Based Steady State Analysis of Three Phase Self-Excited Induction Generator**. IEEE Trans. on En. Con.,15(1):61-65

BODUROĞLU, T., (1981), **Elektrik Makinaları Dersleri Cilt 2**, Beta, İstanbul,

BOHMANN, L. J., WIITANEN, D. O., (1996), **A Variable Voltage and Frequency Scheme to Optimize The Efficiency of A Wind-Driven Induction Generator**, Electric Machines and Power Systems, 24:429-435

BÜYÜKÇINAR, A., ERMİŞ, M., (1985), **Maksimum Güç Transferi Amacıyla Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminin Mikroişlemci Tabanlı Denetimi**, Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongresi, Adana

CHAKRABORTY, C. , BHADRA, S. N., CHATTOPADHYAY, A. K., (1998), **Excitation Requirements For Stand Alone Three-Phase Induction Generator**. IEEE Trans. on En. Con.,13(4):358-364

CHAN, T. H., (1994), **Steady-State Analysis of Self-Excited Induction Generator**. IEEE Trans. on En. Con.,9(2):288-296

CHAN, T. H., (1992), **Capacitance Requirements of Self-Excited Induction Generators**. IEEE Trans. on Energy Conversion,8(2):304-310

DEMİREKLER, M., ÜÇTUĞ, Y., (1985), **Rüzgar Türbini ile Sürülen Kendinden Uyartımlı Endüksiyon Generatörünün Modellenmesi ve Denetimi**, Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongresi, Adana

ELDER, J. M., BOYS, J. T., WOODWARD, J. L., (1983), **The Process of Self-Excitation in Induction Generators**, IEE Proceedings, Pt. B, No. 2, 103-108

ERTAN, H. B., ERMIŞ, M., AKPINAR, E., (1985), **Rüzgardan Elektrik Enerjisi Üreten Bağımsız Bir Güç Kaynağı İçin Optimum Alternatör Tasarımı**, Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongresi, Adana

FIDAN, E., (1996), **Sığaç Uyartımlı Asenkron Generatör**, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C. J., UMANS, S. D., (1983), **Electric Machinery**, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo

GHANI, S. N., (1988), **Digital Computer Simulation of Three-Phase Induction Machine Dynamics-A Generalized Approach**, IEEE Trans. On Industry Applications, 24(1):106-114

GRANTHAM, C., SUTANTO, D., MISMAIL, B., (1989), **Steady-State and Transient Analysis of Self-Excited Induction Generators**, IEE Proceedings, Pt. B, No. 2, 61-68

KRAUSE, P. C., (1987), **Analysis of Electric Machinery**, McGraw-Hill International Editions, Singapore

MURTHY, S. S., MALIK O. P., TANDON, A. K., (1982), **Analysis of Self-Excited Induction Generators**, IEE Proceedings, Vol. 129, No. 6, pp. 260-265

ÖNBİLGİN, G., ŞENLİK, İ., SEZGİN, A., (1995), **Magnetik Saturation in Dynamic Behaviour Modeling of Three Phase Induction Motors with Space Phasors**, Proc. of Int. Conf. On Electrical Machines and Power Electronic, Kuşadası-TURKEY, pp. 78-82

PEŞİNT, M. A., (1996), **Elektrik Makinaları IV-Senkron Makinaları ve Alternatif Akımın Doğrultulması**, Milli Eğitim Basım Evi, İstanbul

SAÇKAN, A. H., (1996), **Elektrik Makinaları III-Asenkron Motorlar**, Milli Eğitim Basım Evi, İstanbul

SALAMA, M.H., HOLMES, P.G., (1996), **Transient and Steady-State Load Performance of a Stand-Alone Self-Excited Induction Generator**. Proc IEE,143(1):50-58

SARIOĞLU, K., (1983), **Asenkron Makinalar**. Çağlayan Kitabevi, İstanbul

SHRIDHAR, L., SINGH, B., JHA, C. S., SINGH B. P., MURTHY, S. S., (1995), **Selection of Capacitors for The Self Regulated Shunt Self Excited Induction Generators**, IEEE Transactions on Energy Conversion, No.3, 10-17

SINGH, B., (1995), **Induction Generators-A Prospective**, Electric Machines and Power Systems, 23:163-177

SINGH, B., SHRIDHAR, L., JHA, C. S., (1999), **Transient Analysis of Self-Excited Induction Generator Supplying Dynamic Load**, Electric Machines and Power Systems, 27:941-954

WANG, L., LEE C-H., (1997), A Novel Analysis on The Performance of An Isolated Self-Excited Induction Generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2

