



**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KAPASİTÖR UYARMALI ASENKRON GENERATÖRÜN  
OPTİMAL KAPASİTESİNİN  
HİBRİT GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ**

**Fevzi ARSLAN**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2010  
DÜZCE**

Fevzi ARSLAN tarafından hazırlanan “Kapasitör Uyarmalı Asenkron Generatörün Optimal Kapasitesinin Hibrit Genetik Algoritma ile Belirlenmesi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nedim TUTKUN .....  
Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK .....  
Elektrik Eğitimi, Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Nedim TUTKUN .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Oğuz ÜSTÜN .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Tarih: 29 / 06 / 2010

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Refik KARAGÜL .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

**Fevzi ARSLAN**

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi, yürütülmesi ve sunuma hazırlanması sırasında, değerli bilimsel görüş ve önerilerinden faydalandığım Doç. Dr. Nedim TUTKUN' a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu çalışmam boyunca her konuda fedakârlık gösteren, maddi manevi yardımlarını esirgemeyen eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamın uygulama kısmında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

**Haziran, 2010**

**Fevzi ARSLAN**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
SEMBOL LİSTESİ .....	xiii
ÖZ .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
1.1. RÜZGÂR ENERJİSİNİN TARİHÇESİ .....	1
1.2. DÜNYADA VE TÜRKİYE' DE RÜZGÂR ENERJİSİ .....	4
1.2.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi.....	4
1.2.2. Ülkemizde Rüzgâr Enerjisi.....	7
1.3. LİTERATÜR ÖZETİ .....	12
2. GENEL KISIMLAR.....	15
2.1. RÜZGÂRDAKİ POTANSİYEL ENERJİ.....	15
2.1.1. Rüzgâr Spektrumlarındaki Mevcut Güç.....	15
2.1.2. Rüzgâr Türbininde Güç ve Döndürme Momenti.....	20
2.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİ.....	22
2.2.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri.....	22
2.2.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri.....	24
2.2.2.1. Darrieus Rotor.....	25
2.2.2.2. Savonius Rotor.....	26
2.2.2.3. Musgrove Rotor.....	27
2.3. RÜZGÂR TÜRBİNİNİN YAPISI.....	28
2.3.1. Kule.....	30
2.3.2. Dişli Kutusu.....	30
2.3.3. Generatör.....	30
2.3.3.1. DA Generatörleri.....	31
2.3.3.2. Senkron Generatörler.....	31
2.3.3.2.1. Alan Sargılı SG.....	31
2.3.3.2.2. Daimi Mıknatıslı SG.....	33
2.3.3.3. Asenkron Generatörler.....	34
2.3.3.3.1. Çift Beslemeli AG.....	34

2.3.3.3.2. Sincap Kafesli AG.....	35
2.3.4. Fren Sistemi.....	36
2.3.5. Rotor.....	37
2.4. RÜZGÂRDAN MAKSİMUM ENERJİ ELDE EDİLMESİ.....	37
2.4.1. Değişken Rotor Hızının Önemi.....	38
2.4.2. Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sürme Sistemleri.....	39
2.4.2.1. Tek Sabit Hızlı Sürücü.....	39
2.4.2.2. İki Sabit Hızlı Sürücü.....	39
2.4.2.3. Değişken Hızlı Dişli Ünitesi.....	40
2.4.2.4. Güç Elektroniği Elemanları Kullanarak Değişken Hızlı Sürücüler.....	40
2.5. ASENKRON MAKİNALAR.....	40
2.5.1. Kendiliğinden Uyarımlı Asenkron Genaratör.....	41
2.5.2. Asenkron Generatörün Çalışma Prensibi.....	41
2.5.3. Asenkron Makinanın Matematik Modeli.....	42
2.5.4. Asenkron Generatörlerde Kendiliğinden Uyarım.....	45
2.5.5. Asenkron Generatör İçin Kapasitör Seçimi.....	47
3. ASENKRON GENERATÖRÜN SÜREKLİ DURUM ANALİZİ.....	49
3.1. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ.....	49
3.2. LİNEER OLMAYAN DENKLEMLERİN ÇÖZÜMÜ.....	53
3.3. NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ.....	53
3.4. SAYISAL TÜREV ALMA.....	55
3.5. GENETİK ALGORİTMALARLAR YÖNTEMİ.....	56
3.5.1. Genetik Algoritmaların Çalışması.....	57
3.5.2. Amaç Fonksiyonu, Değişkenler ve Uygunluk Hesabı.....	62
3.5.3. GA' da Değişkenler.....	63
3.5.4. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması.....	63
3.5.5. Seçim İşlemi.....	64
3.5.5.1. Rulet Çemberi Yöntemi.....	64
3.5.5.2. Sıralama Yöntemi.....	64
3.5.5.3. Turnuva Yöntemi.....	65
3.5.6. Çaprazlama İşlemi.....	65
3.5.6.1. Tek Kesimli Çaprazlama.....	66
3.5.6.2. Çift Kesimli Çaprazlama.....	66
3.5.6.3. Çok Kesimli Çaprazlama.....	66
3.5.6.4. Üniform Çaprazlama.....	66
3.5.6.5. Tersleme.....	66

3.5.6.6. Karıştırmalı aprazlama.....	67
3.5.6.7. Ara Birleşmeli aprazlama.....	67
3.5.6.8. Doğrusal Birleşmeli aprazlama.....	67
3.5.7. Mutasyon İşlemi.....	67
3.6. KULLANILAN ASENKRON GENERATÖR.....	68
3.7. HGA' IN UYGULANILMASI.....	70
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>72</b>
4.1. REZİSTİF YÜKLÜ DURUM.....	72
4.2. ENDÜKTİF YÜKLÜ DURUM.....	82
4.3. KAPASİTİF YÜKLÜ DURUM.....	92
4.4. FARKLI YÜKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	104
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>108</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>110</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>113</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>114</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasitesi.....	5
Şekil 1.2 : Türkiye Rüzgâr Atlası.....	8
Şekil 2.1 : Türbine Yaklaşan Hava Kütlesi.....	16
Şekil 2.2 : Hava Yoğunluğunun Sıcaklıkla Değişimi.....	18
Şekil 2.3 : Hava Yoğunluğunun Yükseklikle Değişimi.....	19
Şekil 2.4 : Rüzgâr Türbinlerinin Kanat Sayısına Göre Sınıflandırılması.....	23
Şekil 2.5 : Rüzgâr Alma Yönüne Göre YERT' ler .....	24
Şekil 2.6 : Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini.....	25
Şekil 2.7 : Savonius Rotorlu Rüzgâr Türbini.....	26
Şekil 2.8 : Savonius Rotorunun Çalışma Prensibi.....	27
Şekil 2.9 : Musgrove Rotorun Çalışma Prensibi.....	28
Şekil 2.10 : Rüzgâr Türbininin Bölümleri.....	29
Şekil 2.11 : Değişken Hızlı Alan Sargılı Senkron Generatör.....	32
Şekil 2.12 : Yükseltici DA-DA Kıyıcısı ile Beslenen Daimi Miknatıslı SG.....	33
Şekil 2.13 : DGM Çeviriciden Beslenen Daimi Miknatıslı Senkron Generatör.....	33
Şekil 2.14 : Çift Beslemeli Rotoru Sargılı Asenkron Generatör.....	34
Şekil 2.15 : Değişken Hızlı Sincap Kafesli Asenkron Generatör.....	35
Şekil 2.16 : Değişik Türbin Verimlerinin Rüzgâr Hızına Göre Değişimi.....	38
Şekil 2.17 : Rotoru Kilitli Asenkron Motorun Bir fazının Eşdeğer Devresi.....	42
Şekil 2.18 : Stator Tarafına Dönüştürülmüş Asenkron Motor Eşdeğer Devresi.....	43
Şekil 2.19 : Asenkron Motor Yaklaşık Eşdeğer Devresi.....	45
Şekil 2.20 : Kapasitör Uyarımlı Asenkron Generatör.....	45
Şekil 2.21 : Artık Miknatısa Sahip Asenkron Generatörde Kendiliğinden Uyarım.....	46
Şekil 2.22 : Asenkron Generatör Miknatıslanma Eğrisi.....	47
Şekil 3.1 : Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatörün Bir faz Eşdeğeri.....	49
Şekil 3.2 : KUAG Eşdeğer Empedanslı Bir faz Eşdeğeri.....	50
Şekil 3.3 : Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatörün Geliştirilmiş Bir faz Eşdeğeri.....	51
Şekil 3.4 : Türevin Geometrik Anlamı.....	56
Şekil 3.5 : Hibrit Genetik Algoritma Akış Şeması.....	59
Şekil 3.6 : $n$ Değişkene Sahip String veya Kromozomun Yapısı.....	61
Şekil 3.7 : $X_M$ ' nin Hesaplanmasında Kullanılan Tipik Bir Devre.....	69
Şekil 3.8 : $X_M$ ile $V_G/F'$ nin Değişim Grafiği.....	70
Şekil 4.1 : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $X_M'$ nin Değişimi.....	73
Şekil 4.2 : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $f'$ nin Değişim.....	74

<b>Şekil 4.3</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.4</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $V_T'$ nin Değişimi.....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.5</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $V_G'$ nin Değişimi.....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.6</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $P_C'$ nin Değişimi.....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $P_G'$ nin Değişimi.....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.8</b> : Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $\eta'$ nin Değişimi.....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Üç Ayrı Omik Yükte $V_T'$ deki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>81</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $X_M'$ nin Değişimi....	<b>83</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $f'$ nin Değişimi.....	<b>84</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi....	<b>85</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $V_T'$ nin Değişimi....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $V_G'$ nin Değişimi....	<b>87</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $P_C'$ nin Değişimi.....	<b>88</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $P_G'$ nin Değişimi.....	<b>89</b>
<b>Şekil 4.17</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $\eta'$ nin Değişimi.....	<b>90</b>
<b>Şekil 4.18</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte $V_T'$ deki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>91</b>
<b>Şekil 4.19</b> : Üç Ayrı Endüktif Yükte $I_L'$ deki Değişmeye Karşılık $P_C'$ nin Değişimi.....	<b>92</b>
<b>Şekil 4.20</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $X_M'$ nin Değişimi....	<b>94</b>
<b>Şekil 4.21</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $f'$ nin Değişimi.....	<b>95</b>
<b>Şekil 4.22</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>96</b>
<b>Şekil 4.23</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $V_T'$ nin Değişimi....	<b>97</b>
<b>Şekil 4.24</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $V_G'$ nin Değişimi....	<b>98</b>
<b>Şekil 4.25</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $P_C'$ nin Değişimi....	<b>99</b>
<b>Şekil 4.26</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $P_G'$ nin Değişimi....	<b>100</b>
<b>Şekil 4.27</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık $\eta'$ nin Değişimi.....	<b>101</b>
<b>Şekil 4.28</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte $V_T'$ nin Değişmesine Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>102</b>
<b>Şekil 4.29</b> : Üç Ayrı Kapasitif Yükte $I_L'$ nin Değişmesine Karşılık $P_C'$ nin Değişimi.....	<b>103</b>
<b>Şekil 4.30</b> : Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $X_M'$ nin Değişimi.....	<b>104</b>
<b>Şekil 4.31</b> : Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $f'$ nin Değişimi.....	<b>105</b>
<b>Şekil 4.32</b> : Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $I_L'$ nin Değişimi.....	<b>106</b>
<b>Şekil 4.33</b> : Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık $V_T'$ nin Değişimi.....	<b>107</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

<b>Çizelge 1.1</b> :Dünyada Rüzgâr Türbini Kurulu Gücüne Göre İlk On Ülke.....	<b>4</b>
<b>Çizelge 1.2</b> :AB Ülkeleri 2010 Yılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Faydalanma Hedefleri	<b>6</b>
<b>Çizelge 1.3</b> :Türkiye’de İşletmedeki Rüzgâr Türbini Kapasite Toplamı.....	<b>9</b>
<b>Çizelge 1.4</b> :Türkiye’de İnşa Halindeki Rüzgâr Çiftlikleri.....	<b>10</b>
<b>Çizelge 1.5</b> :Sözleşmesi İmzalanmış Rüzgâr Çiftlikleri.....	<b>11</b>

## SEMBOL LİSTESİ

<b>E</b>	: Hava akımının kinetik enerjisi
<b>m</b>	: Hava akımının kütlesi
<b>v</b>	: Hava akımının hızı
<b><math>\rho_a</math></b>	: Hava akımının yoğunluğu
<b>V</b>	: Rotora doğru giden mevcut hava yığınının hacmi
<b><math>\ell</math></b>	: Uzunluk
<b>P</b>	: Rüzgârdaki mevcut güç
<b>p</b>	: Basınç
<b>V<sub>G</sub></b>	: Gazın hacmi
<b>n</b>	: Gazın kilomol türünden mol numarası
<b>R<sub>G</sub></b>	: Genel gaz sabiti
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>C<sub>P</sub></b>	: Rotorun güç katsayısı
<b>C<sub>T</sub></b>	: Tork katsayısı
<b>A<sub>T</sub></b>	: Rotorun süpürdüğü alan
<b>P<sub>T</sub></b>	: Türbinin ürettiği güç
<b>F</b>	: Motorun maruz kaldığı itme kuvveti
<b>Z</b>	: Yükseklik
<b>R<sub>R</sub></b>	: Rotor yarıçapı
<b>T<sub>R</sub></b>	: Türbin rotorunun torku
<b>T<sub>T</sub></b>	: Türbin rotorunun ürettiği gerçek tork
<b><math>\lambda</math></b>	: Uç hızı oranı
<b><math>\omega</math></b>	: Açısal hız
<b>N</b>	: Türbin rotorunun dönme hızı
<b>f</b>	: Frekans
<b>2p</b>	: Kutup sayısı
<b>n<sub>S</sub></b>	: Senkron devir sayısı
<b>n<sub>R</sub></b>	: Rotor devir sayısı
<b>s</b>	: Kayma
<b>R<sub>S</sub></b>	: Stator direnci
<b>X<sub>S</sub></b>	: Stator kaçak reaktansı
<b>V<sub>S</sub></b>	: Statora uygulanan faz gerilimi
<b>I<sub>S</sub></b>	: Stator akımı
<b>R<sub>2</sub></b>	: Rotor direnci
<b>X<sub>2</sub></b>	: Rotor kaçak reaktansı
<b>V<sub>2</sub></b>	: Kilitli rotor durumunda rotor sargılarında indüklenen gerilim
<b>I<sub>2</sub></b>	: Rotor akımı
<b>I<sub>0</sub></b>	: Boş çalışma akımı
<b>R<sub>e</sub></b>	: Eşdeğer direnç
<b>R<sub>R</sub></b>	: Stator tarafına dönüştürülen rotor direnci
<b>X<sub>R</sub></b>	: Stator tarafına dönüştürülen rotor kaçak reaktansı
<b>I<sub>R</sub></b>	: Stator tarafına dönüştürülen rotor akımı
<b>I<sub>M</sub></b>	: Mıknatıslanma akımı
<b>I<sub>C</sub></b>	: Kapasitör akımı
<b>X<sub>C</sub></b>	: Kapasitif reaktans
<b>V<sub>T</sub></b>	: AG' ün terminal gerilimi
<b>V<sub>G</sub></b>	: AG' ün hava aralığındaki gerilim

$I_L$	:	Yük akımı
$R_L$	:	Yük direnci
$X_L$	:	Yük kaçak reaktansı
$Z_L$	:	Yük empedansı
$P_{SCu}$	:	Stator sargılarının bakır kayıplar
$P_{RCu}$	:	Rotor sargılarının bakır kayıplar
$P_S$	:	Sabit kayıplar
$P_K$	:	Toplam kayıplar
$P_G$	:	Giriş gücü
$P_Ç$	:	Çıkış gücü
$\eta$	:	Verim
$R_L$	:	Yük direnci
$X_L$	:	Yük reaktansı
$Z$	:	Empedans
$F$	:	pu frekans
$v$	:	pu hız
$\Omega$	:	Objektif fonksiyonu
$\Phi$	:	Uygunluk değeri
$\varepsilon$	:	Hata miktarı

**KAPASİTÖR UYARMALI ASENKRON GENERATÖRÜN OPTİMAL  
KAPASİTESİNİN HİBRİT GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Fevzi Arslan**

**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Haziran 2010**

**ÖZ**

**Bu çalışmada küçük güçlü ve şebekeden bağımsız rüzgâr santrallerinde kullanılan kapasitör uyarımlı asenkron generatörün, değişen yük koşullarında ihtiyaç duyduğu kapasitör miktarı analiz edilmiştir.**

**İlk olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminden bahsedilerek, bunların arasında da rüzgâr enerjisine dikkat çekilmiştir. Ayrıca Dünyadaki ve Türkiye'deki rüzgâr enerjisi potansiyeli ve faydalanma imkânlarından bahsedilmiştir.**

**İkinci olarak, kendinden uyarımlı asenkron generatörlerin rüzgâr enerjisi sistemlerindeki uygulama alanlarından ve bunların araştırılması gereken yönlerinden bahsedilmiştir. Aynı zamanda literatür taraması yapılarak bugüne kadarki uygulamalar hakkında bilgiler verilmiştir.**

**Genel kısımlar bölümünde, ilk olarak rüzgâr enerjisindeki mevcut güçten bahsedilmiştir. Sırasıyla rüzgâr türbini çeşitleri, rüzgâr türbininin yapısı, rüzgârdan maksimum enerjinin elde edilmesi ve asenkron makinaların yapısına değinilmiştir. Daha sonra asenkron generatörün çalışma prensibi açıklanarak asenkron makinanın eşdeğer devresi ve kapasitör uyarımlı asenkron generatörlerin uyartım gereksiniminden bahsedilmiştir. Bununla birlikte asenkron generatörün uyartımı için kullanılacak kondansatörün bir minimum ve maksimum değerinin olduğuna dikkat çekilmiştir.**

Asenkron generatörün sürekli durum analizi bölümünde, kullanılan asenkron generatör ve deney düzeneği, elde edilen verilerin hesaplanmasında kullanılan Newton-Raphson, sayısal türev, genetik algoritmalar yöntemleri anlatılmıştır.

Bulgular bölümünde, değişken yük ve kapasitör değerlerine ait veriler ve bu verilerin elde edilmesine ait aşamalar sunulmuştur.

Sonuçlar bölümünde, değişen koşullarda asenkron generatörün davranışları, verimli ve kaliteli bir enerjinin elde edilebilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

**Bilim Kodu** :

**Anahtar Kelimeler** : Rüzgâr enerjisi, kapasitör uyartımlı asenkron generatör, hibrit genetik algoritma.

**Sayfa Adedi** : 114

**Tez Yöneticisi** : Doç. Dr. Nedim TUTKUN

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL CAPACITANCE FOR THE  
CAPACITOR EXCITED INDUCTION GENERATOR USING THE HYBRID  
GENETIC ALGORITHM  
(M.Sc. Thesis)**

**Fevzi Arslan**

**DUZCE UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
Haziran 2010**

**ABSTRACT**

**In this thesis, a standalone capacitor-excited induction generator used for low power wind plants under varying load conditions is studied from various aspects.**

**Firstly, renewable energy sources are introduced and the significance of the wind power is explained among those energy sources. Besides, development of wind energy and its potential in Turkey and the world for possible utilization is addressed.**

**Secondly, the capacitor-excited induction generator and its application to wind power systems are examined and ongoing investigations are reported. In addition, examples of some typical applications are given by a literature survey up till now.**

**Thirdly, theoretical background of wind energy, construction of wind turbines and its types, production of maximum power from a typical wind turbine and fundamentals of asynchronous machines are stated in the relevant section respectively. Subsequently, the equivalent circuit of the induction generator and the requirement of a capacitor for the self-excited induction generator and its operation are explained in detail. Furthermore, minimum and maximum capacitances for the induction generator are reported and the significance of the excitation range under various load conditions is pointed out.**

**Finally, steady-state analysis of the induction generator, the experimental setup to determine a relationship between the air-gap voltage and the magnetising**

**reactance and the computational algorithm based on the genetic algorithms and the Newton-Raphson method for finding relevant parameters are denoted.**

**Science Code :**

**Key Words : Wind energy, capacitor-excited induction generator, hybrid genetic algorithm.**

**Page Number: 114**

**Adviser : Assoc. Professor Nedim TUTKUN**







# 1. GİRİŞ

Son yıllarda artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Günümüzde enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak bu yakıtların rezervlerinin sınırlı olduğu ve bir gün tükeneceği tahmin edilmektedir. Bunun yanında fosil yakıtların kullanılmasıyla elde edilen enerji, çevre kirliliği ve sera gazları etkisiyle hayatımızı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle gelişmekte olan ve gelişmiş ülkeler bu enerji kaynağının yerine kullanılmak üzere yeni, diğer bir deyişle alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Özellikle rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrojen enerjisi üzerine yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmekte ve bunlarla ilgili yatırımlar da gittikçe artmaktadır.

Bütün bunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesini gündeme getirmiştir. Teknolojinin ilerlemesi ile azalan enerji maliyetleri bilhassa rüzgâr enerjisine olan ilgiyi artırmıştır. Ülkeler yıllık rüzgâr haritalarını çıkardıklarında hiç de göz ardı edilmeyecek bir rüzgâr potansiyeline sahip olduklarını görmüş ve bu alandaki yatırım ve teşviklerini arttırmışlardır.

## 1.1. RÜZGÂR ENERJİSİNİN TARİHÇESİ

Milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanılan rüzgâr enerjisi, denizlerde yelkenli gemilere, karalarda ise, rüzgâr değirmenlerine ve rüzgâr millerine ana güç kaynağı olmuştur. Özellikle buğday, mısır öğütme ve su pompalama gibi gereksinimler uzun yıllar bu yolla çözülmüştür.

Rüzgâr enerjisi kullanımı, M.Ö. 2800' lü yıllarda Orta Doğu' da başlamıştır. M.Ö. 17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgâr enerjisinin [1], aynı dönemde Çin' de de kullanıldığı belirtilmektedir. Rüzgâr değirmenleri ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk rüzgâr değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar rüzgâr değirmenlerini ilk olarak haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir [2]. Fransa Hollanda ve İngiltere' de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlaması ise, 12. yüzyılda olmuştur [3].

Tarımsal ürünleri öğütmek, su pompalamak, hızar çalıştırmak gibi amaçlarla geliştirilen rüzgâr değirmenleri; Avrupa’ da Endüstri Devrimi’ ne kadar hızla yayılmışlardır. 18. yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda’ da 10000 rüzgâr değirmeni bulunuyordu. Buhar makinasının yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile, rüzgâr enerjisi önemini yitirmeye başlamıştır. Bununla beraber, rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makinalar, 1890’ ların başlarında Danimarka’da yapılmıştır [4]. Aynı dönemde, bu makinaların geliştirilmesi için Almanya’ da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgâr kuvvet makinaları yerlerini yakıtlı kuvvet makinalarına bırakırken, rüzgâr enerjisinin kullanımının sürmesi için yeni bir türbin geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen bu rüzgâr türbinlerinin verimi oldukça düşüktü.

1918 yılında Danimarka’ da başlatılan bir çalışma ile, 120’ ye yakın küçük yerleşim merkezindeki elektrik üretimi 20-30 kW’ lık rüzgâr türbinleri kullanılarak yapılmıştır. Bundan tam 13 yıl sonra Rusya’da 100 kW’ lık rüzgâr türbini yapılmıştı. 1941 yılında ABD’ de Vermont yakınlarında Granpa’s Knop’ da 1250 kW gücünde türbin yapılmıştır. Bu türbinin iki kanatlı rotorunun çapı 53 m olup ilk modern rüzgâr türbini olarak bilinir. Toplam ağırlığı 250 ton olan bu rüzgâr santraline, bir milyon dolar yatırım yapılmıştı. Ancak titreşim ve malzeme yorgunluğundan dolayı, 26 Mart 1945 sabahı meydana gelen bir kazada kanatlarından biri kopmuş [5], yaklaşık 8 tonluk kanat 230 m uzağa fırlamıştır.

İkinci Dünya Savaşı’nın ardından 1945’ de İngiltere’ de başlatılan deneysel çalışmalar sonucunda, Enfeld’ da 10 kW gücünde ilk üç kanatlı rüzgâr türbini imal edilmiştir. 1947 yılında Danimarka’ da başlatılan ve modern yaklaşımlar içeren elektrik üretim amaçlı bir başka çalışmanın son ürünü ise, 1959 yılında işletmeye sokulan 200 kW’ lık Gedser türbini [1] olmuştur.

Bu yıllardaki ilgi artışının sebepleri şu şekilde sıralanabilir.

- Hızla artan elektrik enerjisi talebi karşısında, ekonomik olarak geliştirilebilen hidroelektrik kaynakların yakıt tedarikinin yetersiz kalması,

- Hidroelektrik santrallerinin ve buhar türbinlerinin oluşturulmasında, hem ilk yatırım sırasında, hem de enerjinin iletilmesi esnasında hızla artan yüksek maliyetler,
- Savaş sonrasındaki zor ekonomik ve politik koşullar nedeniyle, ülkelerin enerji üretiminde ithal yakıtlar yerine kendi öz kaynaklarına yönelmesi,
- Kömür ve petrol türevli kaynakların yakıt olarak kullanımının yüksek hızla artması ve dolayısıyla rezervlerin azalmaya başlaması,
- Savaş sırasındaki araştırma–geliştirme çalışmalarının sonucunda uçak konstrüksiyonlarında uygulanan aerodinamik bilgi birikiminin büyük bir oranda artması ve bu bilginin büyük rüzgâr türbinlerinin konstrüksiyonu yolunda kullanılabilirliği,
- Yaygın enerji ağına farklı kaynaklardan enerji ve güç bağlanabilmesinin avantajlarının değerlendirilmesi,
- Rüzgâr türbinleri ile ilgili denemelerin yapılması ve bu tip uygulamaların ekonomik bir tesis olarak başarılı olmamasına karşın, rüzgâr enerjisinden faydalanarak elektrik üreten büyük tesislerin pratik olarak iyi bir performansla çalışabileceğinin kanıtlanmasıdır [6].

1961 yılında Roma’ da Birleşmiş Milletler tarafından düzenlenen Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansı’nda ele alınan üç kaynaktan biri rüzgâr enerjisi idi. Böylece, çok eskiden beri bilinen rüzgâr enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu. Ucuz petrol döneminde güncellik kazanmayan rüzgâr enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımları ardından gündeme daha çok girmiştir.

Rüzgâr enerjisinin gelişimine, 1980’ li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık eski tip rüzgâr generatörleri yerine, modern ve çağdaş rüzgâr enerjisi çevrim sistemleri kurulmaktadır. Ayrıca rüzgâr türbinleriyle beraber dizel motor ve güneş fotovoltaik generatörü içeren rüzgâr-dizel-PV hibrit sistemler de geliştirilmiştir. Bir tüketiciyi besleyecek rüzgâr türbini yerine, birden çok türbin içeren rüzgâr çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretim yapılmaya başlanmıştır. Bunun yanında ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç gibi ülkelerde, deniz üstünde, kıyıdan uzakta (off-shore)

rüzgâr santralleri kurulmuştur. Günümüzde küçük yüzölçümüne sahip birçok kuzey Avrupa ülkesinde rüzgâr türbinleri bu şekilde yapılmaktadır.

## 1.2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’ DE RÜZGÂR ENERJİSİ

Dünyada belli başlı ülkelerin, rüzgâr enerjisinden yararlanma konusunda çok ciddi çalışmaları vardır. Bu çalışmaların sonucunda rüzgâr enerjisinden faydalanmak için kurulan rüzgâr çiftliklerinin gücü gittikçe artmaktadır.

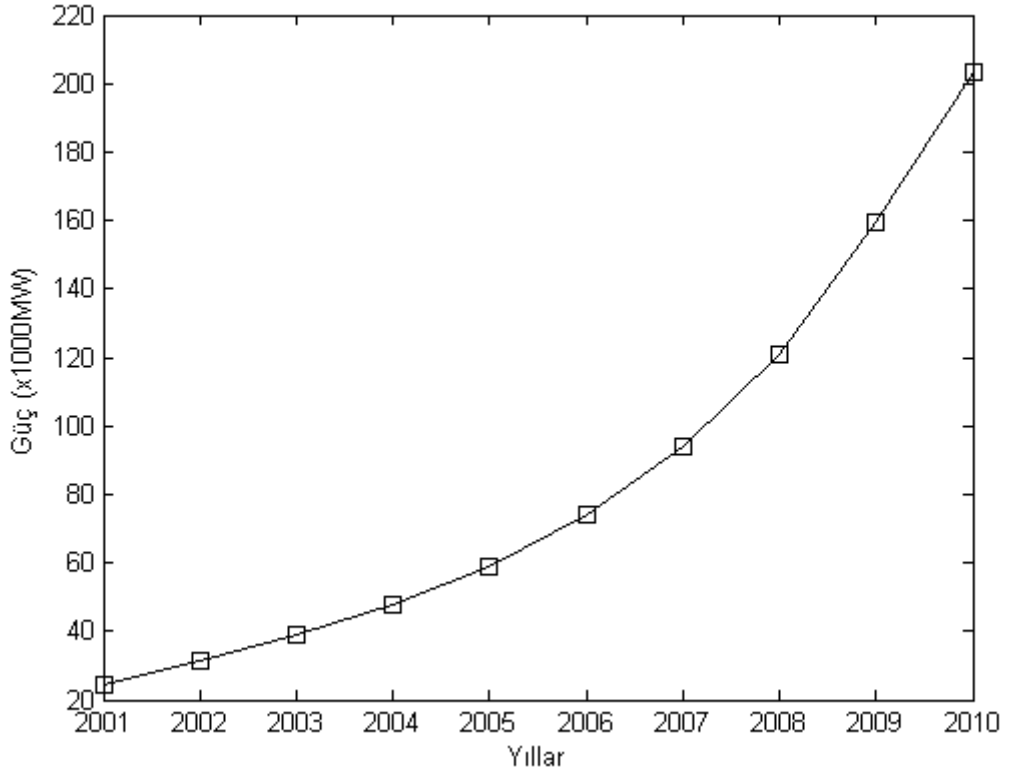
### 1.2.1. DÜNYADA RÜZGÂR ENERJİSİ

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)’ den alınan verilere göre, Ocak 2009 tarihi itibarıyla Dünyada kurulu gücü en yüksek ilk on ülke Çizelge 1.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Dünyada Rüzgâr Türbini Kurulu Gücüne Göre İlk On Ülke

<b>ÜLKELER</b>	<b>2008 BAŞLANGICI (MW)</b>	<b>BUGÜNKÜ TOPLAM ( MW)</b>
Almanya	22 247	23 600
ABD	16 971	25 408
İspanya	15 145	16 000
Danimarka	3 124	3 171
İtalya	2 726	3 290
İngiltere	2 425	3 242
Fransa	2 370	3 427
Portekiz	2 150	2 700
Hollanda	1 747	2 225
Japonya	1 538	1 675
<b>TOPLAM</b>	<b>70 443</b>	<b>84 738</b>

Dünyanın mevcut rüzgâr potansiyeli üzerine yapılan araştırmalara göre, yaklaşık değerler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda yıllık rüzgâr potansiyelinin 53000 TWh olduğu hesaplanmıştır. 2006 yılına göre dünyanın toplam kurulu gücü 74221 MW olduğu düşünüldüğünde mevcut potansiyelin % 1' i bile olmadığı açıkça görülür. Elbette bu güce ulaşmak o kadar da kolay değildir. Rüzgârdan elektrik üretmenin maliyeti buna en büyük etkindir. Teknolojinin ilerlemesi, kurulum ve üretim maliyetlerinin düşmesi rüzgâr enerjisinin daha yaygın bir şekilde kullanılmasına yol açacaktır.



Şekil 1.1 Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurulu Kapasitesi

Dünya rüzgâr enerji birliğinin 2009 raporuna göre 2001-2010 yılları arasında dünyada rüzgâr enerjisi toplam kurulu gücündeki artış Şekil 1.1' de gösterilmiştir. 2010 yılına ait veriler beklentileri belirtmektedir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yıllar içinde artarak sürdüğünü Şekil 1.1' den açıkça görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma oranlarının yükselmesinde Kyoto kriterlerinin ve ülkelerin çıkardığı teşvik yasalarının da büyük etkisi olduğu göz ardı edilmemelidir.

Rüzgâr çiftliklerinden elde edilen elektriğin ülkelerin ulusal şebeke sistemlerindeki elektrik enerjisinde voltaj dalgalanmaları, harmonikler ve frekansta değişmelere yol açtığı bilinen olumsuz etkilerindedir. Bu etkiler alınan çeşitli önlemlerle en aza düşürülmektedir. Normal şebekeler üzerinde yapılan çalışmalarda rüzgâr enerjisi kapasitesinin şebekeye % 20 düzeyine kadar girişinde, hiçbir teknik sorun yaratmadığı tespit edilmiştir.

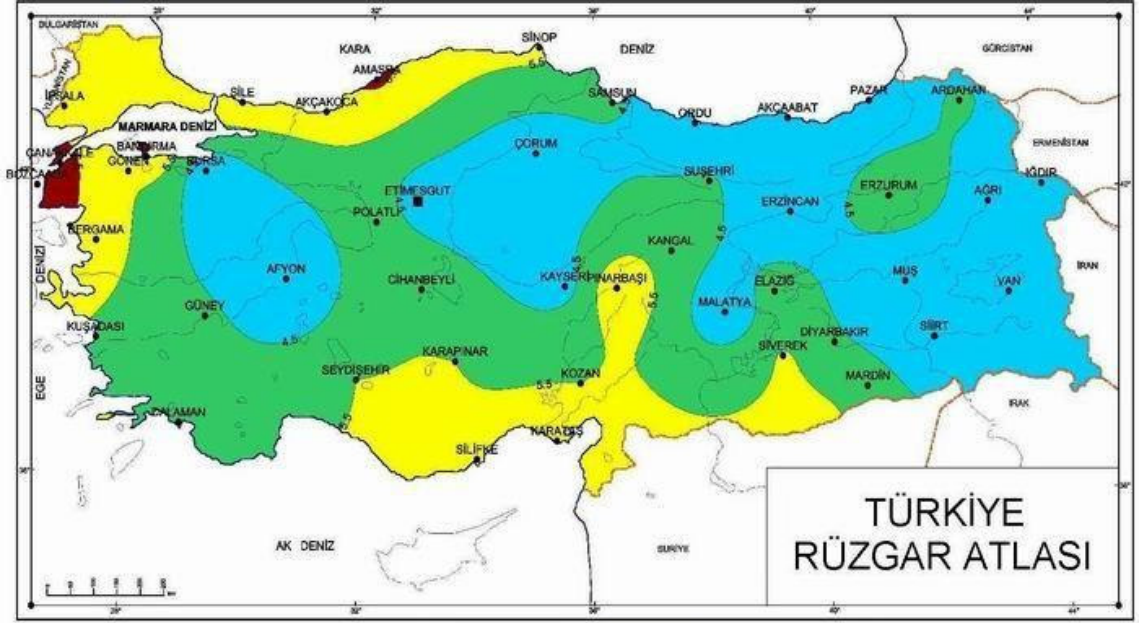
27.10.2001 tarih 2001/77/EC sayılı yönergesine göre, AB' ye üye ülkelerin 2010 yılında tüketecekleri enerjinin ortalama olarak % 22` sini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayacaklarını taahhüt etmiş olmalarıdır. Ülke bazında hedefleri gösteren rakamlar Çizelge 1.2` de verilmiştir.

Çizelge 1.2 AB Ülkeleri 2010 Yılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Faydalanma Hedefleri

Ülke	1997 (%)	2010 Hedefi (%)
Almanya	4,5	12,5
Avusturya	70,0	78,1
Belçika	1,1	6,0
Danimarka	8,7	29,0
Finlandiya	24,7	31,5
Fransa	15,0	21,0
Hollanda	3,5	9,0
İngiltere	1,7	10,0
İspanya	19,9	29,4
İsveç	49,1	60,0
İtalya	16,0	25,0
Lüksemburg	2,1	5,7
Portekiz	38,5	39,0
Yunanistan	8,6	20,1
<b>Ortalama</b>	<b>13,9</b>	<b>22,0</b>

### 1.2.2. ÜLKEMİZDE RÜZGÂR ENERJİSİ

Rüzgâr enerjisinden yararlanmak amacıyla sürdürülen çalışmaların ilkinin potansiyel belirleme çalışmaları oluşturmaktadır. Türkiye' de genel amaçlı rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Ülke genelinde rüzgâr enerjisi kaynağına dayalı plan ve programların yapılabilmesi, bu kaynağın potansiyelinin belirlenmesi ile mümkündür. Bu amaçla, DMİ' ne ait istasyonların 1970-1980 yılları arasındaki kayıtları değerlendirilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgâr enerjisi dağılımı genel olarak belirlenmiştir. Ancak, rüzgârdan elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalarda ayrıntılı rüzgâr potansiyel değerlendirme çalışmaları gerekli olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ülkemizde, ilk aşamada belirlenmiş olan ve rüzgâr enerjisi yönünden umut verici yerlerde yapılan etütler ile rüzgârdan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere rüzgâr enerjisi gözlem istasyonları kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. EİE' nin ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızları, bu bölgelerin birçoğunun rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar bazı firmaları rüzgâr çiftlikleri kurmak için cesaretlendirmiş ve kendi rüzgâr ölçümlerini yapmasına neden olmuştur. Firmaların sunduğu ön fizibilite ve fizibilite raporları EİE Rüzgâr Enerjisi Şubesi tarafından gerek yasal mevzuatlar açısından gerekse de WAsP ve WindPro yazılımları ile santral sahasından üretilebilecek enerji miktarının tespiti ve optimum rüzgâr çiftliği tasarımının değerlendirilmesi açısından incelenmektedir.



	Dark Blue	Red	Yellow	Green	Light Blue
U (m/s)	> 7.5	6.5 – 7.5	5.5 – 6.5	4.5 – 5.5	< 4.5
P (W/m <sup>2</sup> )	> 500	300 - 500	200 - 300	100 - 200	< 100

\* Açık yüzeyler için (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki) rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları

Şekil 1.2 Türkiye Rüzgâr Atlası [7]

Şekil 1.2’ de EİE’nin hazırladığı ülkemize ait rüzgâr atlası görülmektedir. Rüzgâr atlasının hazırlamasından sonra, ülkemizde ilk rüzgâr çiftliği Alize A.Ş. tarafından 1998 yılında İzmir Çeşme’de kurulmuştur. Kurulan bu rüzgâr çiftliği grubu, Enercon firmasından tedarik edilen 3 adet 500 KW’ lık rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Aynı yıl içinde Güçbirliği A.Ş. de, yine aynı bölgede, Vestas firmasında tedarik ettiği 12 adet 600 KW’ lık rüzgâr türbininden oluşan bir rüzgâr çiftliği kurmuştur.

2000 yılında Bores A.Ş. Çanakkale Bozcaada’ ya Enercon’ dan tedarik ettiği 17 adet 600 KW’ lık rüzgâr çiftliği kurmuştur. 2003 yılında Sunjüt A.Ş. İstanbul Hadımköy’ e 2 adet 600 KW’ lık Enercon rüzgâr çiftliği kurmuştur.

Bütün bu gelişmelerin sonucunda ülkemizde, 18 Mayıs 2005 tarihinde yenilenebilir enerji kaynakları yasası çıkartılmış. Bu kanunun amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların

değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir [8].

5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynakları kanunu ve teşvikler sonucunda yatırımlar hızlanmıştır.

Çizelge 1.3 Türkiye’ de İşletmedeki Rüzgâr Türbini Kapasite Toplamı

ŞİRKET	MEVKİ	YIL	GÜÇ (MW)	TEDARİKÇİ
Alize A.Ş.	İzmir-Çeşme	1998	1,50	Enercon
Güçbirliği A.Ş.	İzmir-Çeşme	1998	7,20	Vestas
Bores A.Ş.	Çanakkale-Bozcaada	2000	10,20	Enercon
Sunjüt A.Ş.	İstanbul-Hadımköy	2003	1,20	Enercon
Yapısan A.Ş.	Balıkesir-Bandırma	I/2006	30,00	GE
Ertürk A.Ş.	İstanbul-Silivri	II/2006	0,85	Vestas
Mare A.Ş.	İzmir-Çeşme	I/2007	39,20	Enercon
Deniz A.Ş.	Manisa-Akhisar	I/2007	10,80	Vestas
Anemon A.Ş.	Çanakkale-İntepe	I/2007	30,40	Enercon
Doğal A.Ş.	Çanakkale-Gelibolu	II/2007	14,90	Enercon
Deniz A.Ş.	Hatay-Samandağ	I/2008	30,00	Vestas
İnnores A.Ş.	İzmir-Aliaga	I/2008	42,50	Nordex
Lodos A.Ş.	İstanbul-Gaziosmanpaşa	I/2008	24,00	Enercon
Ertürk A.Ş.	İstanbul-Çatalca	I/2008	60,00	Vestas
Baki A.Ş.	Balıkesir-Şamlı	II/2008	90,00	Vestas
Dares A.Ş.	Muğla-Datça	II/2008	10,00	Enercon
<b>Toplam</b>			<b>433,35</b>	

EİE’ nin 04.02.2009 tarihli verilerine göre ülkemizdeki rüzgâr çiftlikleri Çizelge 1.3’ de belirtilmiştir.

Toplam kurulu gücün 433,35 MW olduğu tablodan açıkça görülmektedir. Halen inşa halinde olan rüzgâr santralleri de vardır. Yapımı devam eden bu çiftlikleri Çizelge 1.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 1.4 Türkiye’ de İnşa Halindeki Rüzgâr Çiftlikleri

ŞİRKET	MEVKİ	YIL	GÜÇ (MW)	TEDARİKÇİ
Ayen A.Ş.	Aydın-Didim	I/2009	31,5	Suzlon
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ	II/2009	35,1	Nordex
Ezse Ltd. Şti.	Hatay-Samandağ	II/2009	22,5	Nordex
Rotor A.Ş.	Osmaniye-Bahçe	II/2009	135	GE
Mazı-3 Res Elk. Ür. A.Ş.	İzmir - Çeşme	II/2009	22,5	Nordex
Kores A.Ş.	İzmir-Çeşme	II/2009	15	Nordex
Soma A.Ş.	Manisa-Soma	II/2009	140,8	Enercon
<b>Toplam</b>			<b>402,4</b>	

Bunların yanı sıra tedarik sözleşmesi imzalanmış projeler de mevcut olup Çizelge 1.5’ de verilmiştir.

Çizelge 1.5 Sözleşmesi İmzalanan Rüzgâr Çiftlikleri

ŞİRKET	MEVKİ	GÜÇ (MW)	TEDARİKÇİ
Alize A.Ş.	Balıkesir-Susurluk	19,00	Enercon
Borasco A.Ş.	Balıkesir-Bandırma	45,00	Vestas
Alize A.Ş.	Tekirdağ-Şarköy	28,80	Enercon
Alize A.Ş.	Balıkesir-Havran	16,00	Enercon
Alize A.Ş.	Çanakkale-Ezine	20,80	Enercon
Belen A.Ş.	Hatay-Belen	30,00	Vestas
Alize A.Ş.	Manisa-Kırkağaç	25,60	Enercon
Boreas A.Ş.	Edirne-Enez	15,00	Nordex
Doruk A.Ş.	İzmir-Aliğa	30,00	Enercon
Yapısan İnş. Elk. San.Tic. A.Ş.	İzmir-Aliğa	90,00	Nordex
Doğal A.Ş.	İzmir-Aliğa	30,00	Enercon
Doğal A.Ş.	İzmir-Foça	30,00	Enercon
Poyraz A.Ş.	Balıkesir-Kepsut	54,90	Enercon
Bilgin Elektrik Üretim A.Ş.	Manisa-Soma-Kırkağaç	90,00	Nordex
Bares Elektrik Üretim A.Ş.	Balıkesir-Kepsut	142,50	Nordex
<b>Toplam</b>		<b>667,60</b>	

Sözleşmesi yapılan ve inşa halindeki rüzgâr santralleri ile birlikte toplam kurulu kapasite 1503,35 MW' a ulaşmaktadır. Yukarıdaki Tablo 1.3, Tablo 1.4, Tablo 1.5 incelendiğinde görülüyor ki planlanan bütün projeler Marmara, Ege ve Akdeniz bölgesinde uygulanmış olup diğer bölgelerde bu alanda bir çalışmanın olmadığı görülmektedir.

### 1.3. LİTERATÜR ÖZETİ

Dünyada mevcut enerji kaynaklarını; fosil, yenilenebilir ve yeni enerji kaynakları olarak sınıflandırabiliriz. Kömür, petrol ve doğal gaz, fosil kaynaklardır. Su, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyomas yenilenebilir enerji kaynaklarını oluşturur. Nükleer enerji, yakıt hücreleri ve hidrojen enerjisi gibi, yakın zamanlarda gündeme gelmiş olan kaynaklarsa, yeni kaynaklar olarak sınıflandırılabilir.

Enerjinin kolay temin edilmesi, bol ve yaygın olması, istenen enerjilere kolay dönüştürülmesi, çevreye zarar vermemesi en önemli ayırt edici özelliklerindedir. Bu açıdan bakıldığında, fosil yakıtların, çevreye kirliliğine yol açması ve rezervlerinin sınırlı olması, yeni enerji kaynaklarının kullanım alanlarındaki kısıtlılıklar ve çevre kirliliğine yol açması gibi özelliklerinden dolayı yenilenebilir enerjilere ilgi son yıllarda gittikçe artmıştır [9]. Teknolojinin ilerlemesi, artan nüfusla birlikte enerjiye olan ilgiyi daha da artırarak alternatif enerji kaynakları üzerinde daha fazla düşünülmesine ve hızlı bir şekilde politikaların üretilmesini zorunlu kılmıştır.

Ülkemizde de enerji maliyetlerini düşürmek için çıkartılan yeni yasalarla yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapılması teşvik edilmiştir. Bu amaçla çıkartılan 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun”, 18.05.2005 tarih ve 25819 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Yenilenebilir enerji kaynak alanlarının korunması, bu kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin belgelendirilmesi ve bu kaynakların kullanımına ilişkin usul ve esasları bu kanunla düzenlenmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminin artmasından dolayı, rüzgâr, küçük hidroelektrik ve biyomas gibi enerji kaynakları ile sürülen bağımsız çalışan güç generatörleri de büyük önem kazanmıştır [10]. Yerleşim yerlerinden uzaktaki uygulama alanlarında şebekeden ayrı çalışan generatörler bu enerji kaynakları ile döndürülerek aydınlatma, ısınma, su pompalama gibi amaçlar için elektrik üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Ulusal şebekeden ayrı çalışan bazı uygulama alanlarında kendinden uyarımlı asenkron generatörler, gelişen teknoloji ve kontrol yöntemleri ile beraber, yapılarının sade, birim maliyetlerinin düşük, fırçasız bir yapıya sahip olmaları, kolay kolay arıza yapmamaları, uyarım için ayrı bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları ve kısa devre akımlarına karşı dayanıklı olmaları nedeniyle ön plana çıkmışlardır [9][11][12].

Kendinden uyarımlı bir asenkron generatörün, dışarıdan bağlanan bir kapasitörle uyarılabildiği bilinmektedir [13]. Kendinden uyarımlı asenkron generatörün (KUAG) elektrik üretmesi için bazı şartların sağlanması gerekir. Bu şartlar;

- Kutuplarındaki artık mıknatıslık,
- Uçlarına bağlanacak uyarım kondansatörü,
- Dışarıdan bir sürücü ile yeterli hızda döndürülmesi [14], şeklinde sıralanabilir.

Bununla birlikte değişken yük koşullarında terminal voltajı ve frekansının kontrol edilmesindeki güçlüklerden dolayı yıllarca çok fazla pratik uygulama alanı bulamamıştır.

Kapasitör ile uyarılan asenkron generatörlerle enerji üretiminde önemli sorunlar vardır. Öz uyarımın sağlanması, terminal voltajının ve frekansın sabit tutulması bunların başında gelir. Uyarımın sağlanması için KUAG' ün terminal uçlarına bağlı minimum bir kapasite olmalıdır [15]. KUAG ün çalışması için ayrıca bir de maksimum değer olmalıdır. Maksimum değer ayrıca makinanın hız ve yük değişmelerinden de etkilenmektedir [11]. KUAG' lerde terminal uçlarındaki gerilim uyarım kondansatörü ile ayarlanabilmektedir.

Stator sargılarına kondansatörler bağlı bir asenkron makina, milden tahrik edildiğinde, belli bir hızdan sonra gerilim üretmeye başlar. Özellikle generatör olarak çalışmanın incelenmesinde mıknatıslanma eğrisi ve tek fazlı eşdeğer devre kullanılmıştır [16].

KUAG' ün kararlı hal performansını hesaplayan araştırmacılar genelde; iteratif yöntemlerle hesaplanan, düğüm empedansı ya da düğüm admitansı yöntemini benimsemişlerdir [17].

KUAG'ün matematik modelinden ve mıknatıslanma karakteristiğinden yararlanarak, Makinanın  $X_m$ ,  $F$ , ve  $E_g$  gibi değerleri Newton-Raphson metodu ile bulunabilir [18]. Haque [19] asenkron generatörün voltaj kararlılığı için kapasitör seçimini araştırmış ve kapasitördeki değişimin generatör parametrelerine etkisini MATLAB yazılımında 'fsolve' fonksiyonu ile hesaplamıştır.

Görülüyorki önceki araştırmacılar asenkron generatör için kapasitör seçiminde, basit matematik teknikleri, Newton-Raphson, fsolve gibi değişik nümerik teknikleri sıkça kullanmışlardır. Bu tekniklerde; türev alma zorluğu, isabetli ilk değer atama, hesaplama süresinin uzun sürmesi gibi güçlüklerden dolayı çözüm aralığı kısıtlıdır.

Kendinden uyartımlı asenkron generatörün frekans, mıknatıslanma reaktansı ve hava aralığındaki gerilim değerlerinin hesaplanmasında Newton-Raphson yöntemi kullanırken doğru değer aralığı belirlemek gerekir. Hatta bu yöntem bütün değerler için bir çözüm üretmemektedir. Newton-Raphson yerine Genetik Optimizasyon gibi, fonksiyonların global optimum noktalarını daha iyi hesapladığını biliyoruz.

Biz de bu çalışmamızda, müstakil çalışan kapasitör uyartımlı asenkron generatörlerde sürekli durum analizini 'Hibrit Genetik Algoritma' (HGA) yöntemini kullanarak, değişen yük koşulları ve geniş bir kapasite aralığında araştırarak daha somut ve faydalı sonuçlar elde etmeyi hedefliyoruz.

## 2. GENEL KISIMLAR

Bir rüzgâr santrali kurulmadan önce türbin için en uygun yer seçimi bilimsel araştırmaların sonucunda tespit edilir. Bölgenin rüzgâr potansiyeli en iyi bir şekilde değerlendirilerek kurulacak santralin parametreleri belirlenir. Rüzgârdan enerji üretmede yer seçiminin yanı sıra kullanılacak generatör de önemli bir yer tutar.

### 2.1. RÜZGÂRDAKİ POTANSİYEL ENERJİ

Rüzgârda mevcut olan enerji, basitçe yeryüzündeki çok büyük miktardaki, hava kütlelerinin kinetik enerjisidir. Rüzgâr türbininin kanatları en son kullanıma bağlı olarak bu enerjiyi, mekanik veya elektriksel enerjiye dönüştürür. Başka enerji formlarına dönüştürülen rüzgârın verimliliği çoğunlukla rüzgâr akımı ile etkileşen rotorun verimine bağlıdır. Bu bölümde, rüzgâr enerjisi dönüşüm süreci ile ilgili olan prensiplere yerverceğiz.

#### 2.1.1. Rüzgâr Spektrumlarındaki Mevcut Güç

$v$  hızıyla hareket eden,  $m$  kütleli hava akımının kinetik enerjisi aşağıdaki gibidir.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad [20] \quad (2.1)$$

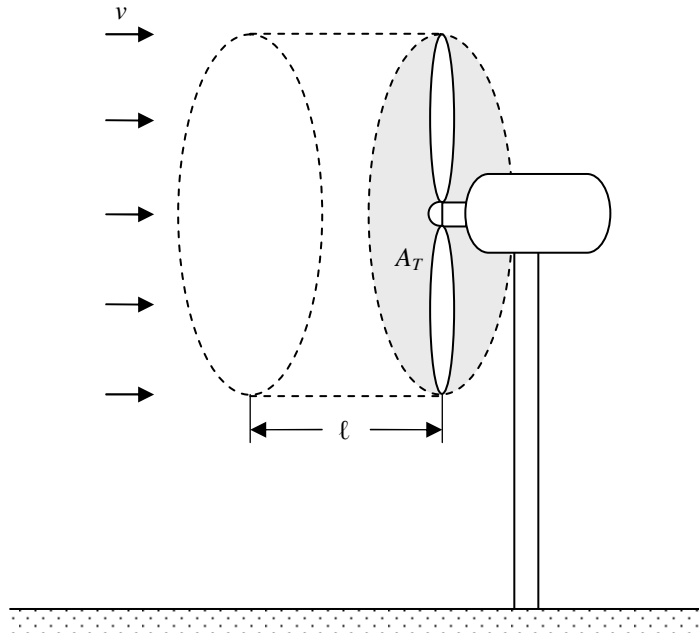
Şekil 2.1' de gösterildiği gibi, hava akımına maruz kalan,  $A_T$  kesit alanlı bir rotor düşünelim. Türbin için mevcut hava akımının kinetik enerjisi, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E = \frac{1}{2}\rho_a Vv^2 \quad [20] \quad (2.2)$$

Burada;  $\rho_a$  hava yoğunluğu ve  $V$  rotora doğru giden mevcut hava yığınının hacmidir. Birim zamanda rotor ile etkileşen hava kütlesi; rotorun kesit alanına eşit ve yoğunluğu da rüzgârın hızına eşit olan bir kesit alanına sahiptir. Yani güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T v^3 \quad [20] \quad (2.3)$$

2.3 eşitliğinde; rüzgâr akımından elde edilen gücü etkileyen; rüzgâr hızını, rüzgâr rotor alanını ve hava yoğunluğunu görebiliriz. Rüzgâr hızının etkisinin, gücü kübik bir şekilde etkileyeceği çok açık bir şekilde görülüyor.  $v$  hızıyla ilerleyen bir hava kütesinin  $A_T$  kesitini tarayan bir rotor ile nasıl etkileştiği Şekil 2.1’ de görülmektedir.



Şekil 2.1 Türbine Yaklaşan Hava Kütesi

Sıcaklık, atmosfer basıncı, yükseklik ve hava bileşenleri gibi etkenler, hava yoğunluğunu etkiler. Kuru hava bir ideal gaz gibi düşünülebilir. İdeal gaz yasasına göre aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$pV_G = nR_G T \quad [20] \quad (2.4)$$

Burada;  $p$  basınç,  $V_G$  gazın hacmi,  $n$  gazın kilomol türünden mol numarası,  $R_G$  genel gaz sabiti,  $T$  de sıcaklıktır. 1 kilo mol hava kütesinin, hacmine oranı olarak hava yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\rho_a = \frac{m}{V_G} \quad [20] \quad (2.5)$$

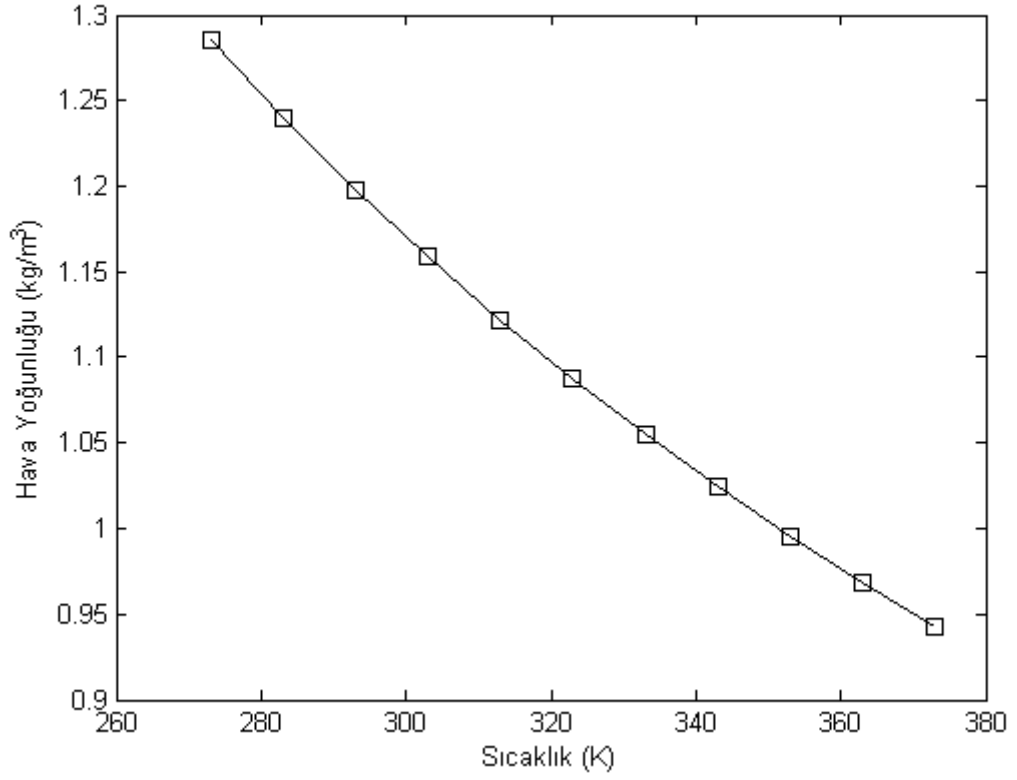
2.4 ve 2.5 eşitliğinden, yoğunluk aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_a = \frac{mp}{R_G T} \quad [20] \quad (2.6)$$

Eğer bir yerin,  $Z$  yüksekliğini ve  $T$  sıcaklığını bilirsek, o zaman yoğunluğunu aşağıdaki eşitliği kullanarak hesaplayabiliriz.

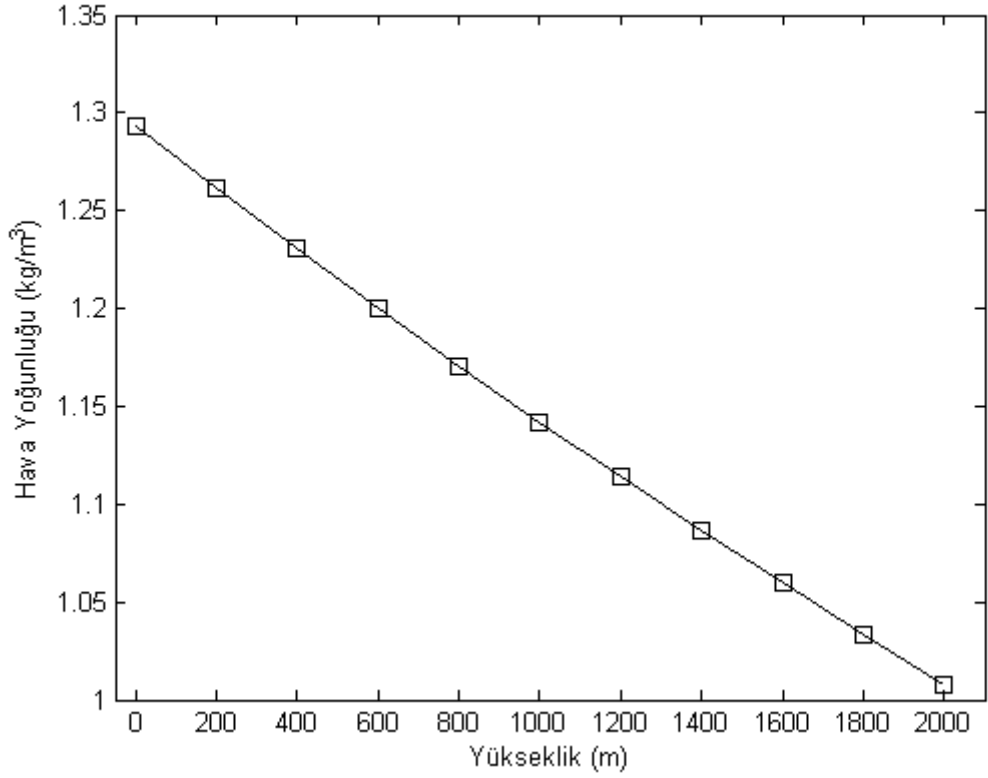
$$\rho_a = \frac{353,049}{T} e^{\left( \frac{-0,034Z}{T} \right)} \quad [20] \quad (2.7)$$

Yükseklik 50 metrede sabit olduğu düşünüldüğünde formül 2.7' ye göre  $\rho_a = f(T)$  grafiği elde edildiğinde, sıcaklık arttığında hava yoğunluğunun azaldığını Şekil 2.2' den görebiliriz.



Şekil 2.2 Hava Yoğunluğunun Sıcaklıkla Değişimi

Bu defa sıcaklık oda sıcaklığında sabit tutulup yine formül 2.7' ye göre  $\rho_a = f(Z)$  grafiği elde edildiğinde yükseklik arttıkça hava yoğunluğunun azaldığını Şekil 2.3' den görebiliriz.



Şekil 2.3 Hava Yoğunluğunun Yükseklikle Değişimi

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’ de görüldüğü gibi, sıcaklık ve yükselti arttıkça, hava yoğunluğu azalır. Birçok pratik uygulamada hava yoğunluğu 1,225 olarak alınabilir. Bu göreceli düşük yoğunluk yüzünden, rüzgâr oldukça yayılmış bir enerji kaynağıdır. Bu yüzden büyük güç üretmek için, çoğu zaman büyük sistemler gereklidir.

Rüzgâr spektrumlarındaki mevcut gücü belirleyen en bilinen faktör onun hızıdır. Rüzgâr hızı ikiye katlandığı zaman, mevcut güç, 8 kat artar. Diğer bir deyişle aynı güç için; eğer sistem, rotor hızı iki kat olan bir yere yerleştirilirse, rotor alanı 8 kat oranında azaltılabilir. Bu nedenle, doğru bir yer seçmek, rüzgâr gücü projelerinin başarısında önemli bir rol oynamaktadır. Gelecek bölümlerde, bu konu ayrıntılı bir biçimde irdelenecektir.

### 2.1.2. Rüzgâr Türbininde Güç ve Döndürme Momenti

Rüzgâr akımındaki mevcut teorik güç 2.3' deki eşitlikte verilmektedir. Bununla birlikte bir türbin bu gücü rüzgârdan tamamıyla alamaz. Rüzgâr akışı türbine geçtiği zaman, rotora bir parça kinetik enerji transfer eder ve hava geri kalan rüzgârı uzağa taşır. Bu nedenle rotor tarafından üretilen gerçek güç, rüzgârdan rotora bu enerji transferinin meydana getirdiği verim ile belirlenebilir. Bu verim genel olarak güç katsayısı olarak adlandırılır. Böylece rotorun güç katsayısı, rotor tarafından üretilen gerçek gücün, rüzgârdaki mümkün olan teorik güce oranı olarak tanımlanır.

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T v^3} \quad [20] \quad (2.8)$$

Burada;  $P_T$  türbinin ürettiği güçtür. Türbindeki güç katsayısı, rotor kanatlarının profili, kanat düzeni ve ayarlama gibi birçok faktöre bağlıdır. Bir tasarımcı çok geniş kapsamlı rüzgâr hızlarında, maksimum güç katsayısını elde etmek için, güç katsayısının optimum seviyedeki bu parametreleri belirlemeye çalışır. Rotorun maruz kaldığı itme kuvveti ( $F$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T v^2 \quad [20] \quad (2.9)$$

Böylece rotor torkunu ( $T_R$ ) şöyle söyleyebiliriz;

$$T_R = \frac{1}{2} \rho_a A_T v^2 R_R \quad [20] \quad (2.10)$$

Burada;  $R_R$  rotor yarıçapıdır. Bu teorikte maksimum torktur ve pratikte yalnızca rotor milinin bileşenlerinin maksimum sınırları geliştirilebilir. Rotor tarafından üretilen gerçek tork ile teorik tork arasındaki orantı, tork katsayısı olarak adlandırılır.

$$C_T = \frac{2T_T}{\rho_a A_T v^2 R_R} \quad [20] \quad (2.11)$$

Burada;  $T_T$  rotorun ürettiği gerçek torktur. Belli rüzgâr hızında rotor tarafından üretilen güç, rüzgâr ile rotor ucu arasındaki bağıl hıza bağlıdır. Örneğin çok düşük hızda dönen rotor ile rüzgârın bu rotora yaklaştığı durumu ele alalım. Bu durumda rotora yaklaşan hava akımının bir kısmı, kanatlar ile etkileşmeden ve enerji transferi yapmadan geçer gider. Benzer bir şekilde, eğer rotor hızlı dönüyor ve rüzgâr hızı düşük ise rüzgâr akışı, türbinden sapabilir ve enerji, türbilans saçılması yüzünden geçer gider. Yukarıdaki her iki durumda, rotor ile rüzgâr akışı arasındaki etkileşim verimli değildir ve bu nedenle çok küçük güç katsayısına yol açar. Rüzgâr hızı ve rotor uç hızı arasındaki oran, uç hızı oranı ( $\lambda$ ) diye adlandırılır. Böylece;

$$\lambda = \frac{R_R}{v} \omega = \frac{2NR_R}{v} \pi \quad [20] \quad (2.12)$$

Burada;  $\omega$  açısal hız ve  $N$  rotorun dönme hızıdır. Rotorun güç katsayısı ve tork katsayısı, uç hızı oranı ile değişir. Enerji transferinin en verimli olduğu rotorda, optimum uç hız oranı mevcuttur ve bunun sonucunda güç katsayısı maksimum'dur. Şimdi güç katsayısı ve uç hızı oranı arasındaki bağıntıyı ele alalım.

$$C_P = \frac{2P_T}{\rho_a A_T v^3} = \frac{2T_T \omega}{\rho_a A_T v^3} \quad [20] \quad (2.13)$$

2.13' deki eşitliği 2.11' deki eşitliğe bölerek elde ederiz.

$$\frac{C_P}{C_T} = \frac{R_R}{v} \omega = \lambda \quad [20] \quad (2.14)$$

Böylece; rotorun uç hızı oranı, güç katsayısı ile tork katsayısı arasındaki bir oran ile verildi.

## 2.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİ

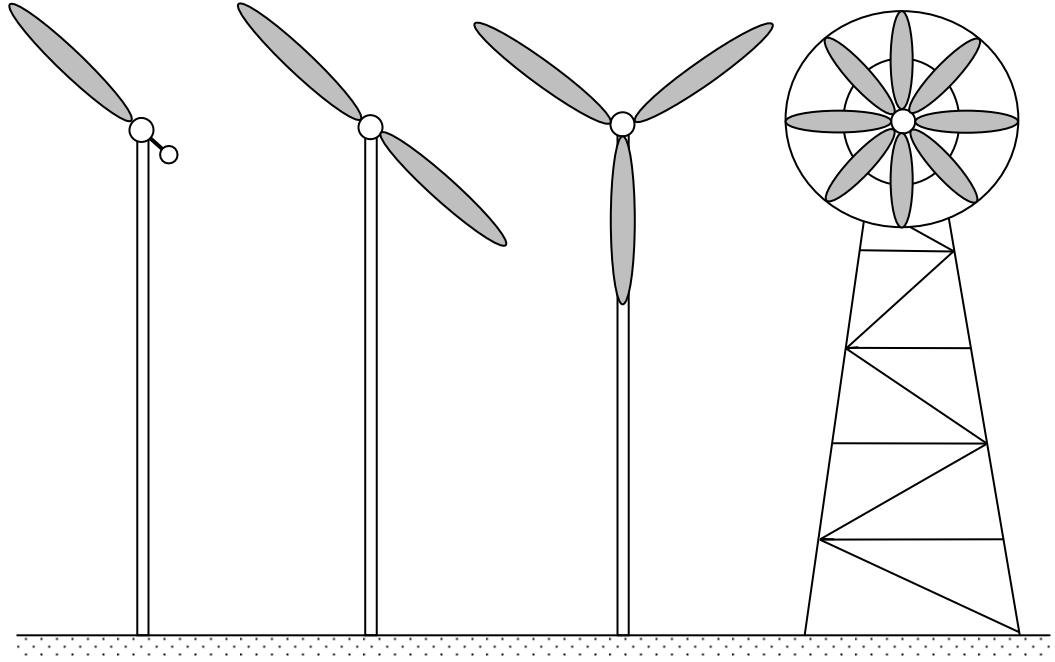
Dünyanın farklı bölgelerinde, rüzgâr enerjisi teknolojisi, başlangıcından beri birkaç tip ve şekilde dizayn edildi ve bunlar geliştirildi. Bunlardan bazıları, ticari olarak kabul görmeyen yenilikçi tasarımlardır. Rüzgâr türbinlerini sınıflandırmak için birçok yol olmasına rağmen; bu türbinler kabaca dönme eksenine göre; yatay eksenli ve düşey eksenli makinalar olarak sınıflandırılırlar.

### 2.2.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin (YERT), dönme eksenini zemine yatay ve hemen hemen rüzgâr akımına paraleldir. Ticari amaçlı rüzgâr türbinlerinin çoğu bu sınıftadır. YERT' leri düşük hızlarda belirgin avantajlara sahiptir. Genel olarak bunlar emsallerine göre yüksek güç katsayısı (performansı) değerine sahiptirler. Bununla birlikte, bu türbinlerde generatör ve vites kutusu, kule tepesinde yer alır ki böyle bir dizayn yapmak karmaşık ve pahalıdır. Bir başka sakıncası ise türbini rüzgâra doğru sürmek için bir kuyruğa veya sağa sola sapmaya gereksinim duyarlar.

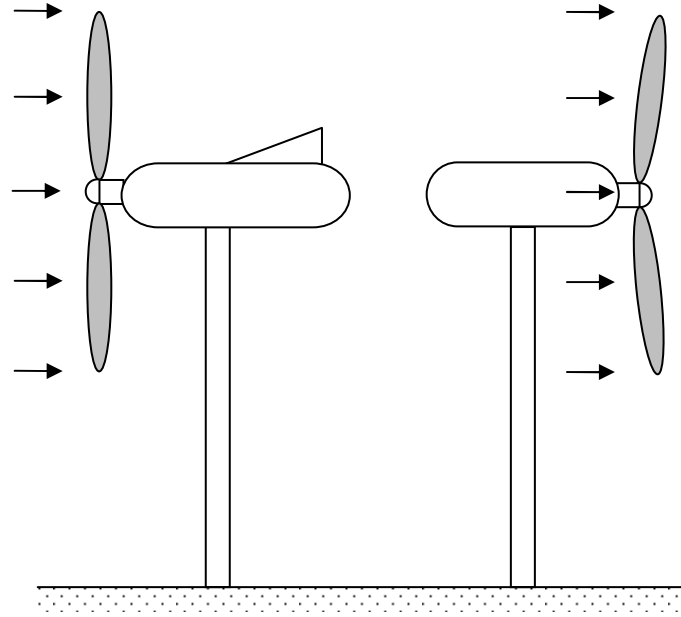
Kanat sayısına bağlı olarak YERT' leri ayrıca; tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak ayrıntılı bir şekilde sınıflandırılması Şekil 2.4' te gösterilmiştir.

Tek kanatlı türbinler, malzemedeki tasarrufundan dolayı daha ucuzdur. Ayrıca bu türbinlerde, çekme kaybı minimumdur. Halbuki kanat balansını dengelemek için zıt istikamete tekerlek şeklinde karşı ağırlık konmuştur. Tek kanatlı tasarımlar, dengeleme problemini tam olarak gideremediğinden ve görsel kabuledilebilirliğinden dolayı çok popüler değildir. İki kanatlı tasarımlarda da bu engeller vardır ancak daha küçüktür. Mevcut ticari amaçla elektrik üreten türbinlerin çoğu, üç kanatlıdır. Üç kanatlı türbinler, aerodinamik yüklenmelere karşı göreceli olarak daha kararlıdır.



Şekil 2.4 Rüzgâr Türbinlerinin Kanat Sayısına Göre Sınıflandırılması

Kanat sayısı daha fazla olan makinaların ayrıca 6, 8, 10, 12 hatta daha çok kanatlıları mevcuttur. Bundan dolayı çok kanatlı rotorlar, yüksek dayanımlı rotorlar diye adlandırılırlar. Bu rotorlar, başlangıçta daha büyük rotor alanının rüzgârı ile etkileşmesinden dolayı kolayca çalışırlar. Bazı düşük dayanımlı tasarımlara, harici başlatma gerekir. İki rotor göz önünde bulunduralım, çapları aynı, kanat sayıları farklı; biri 3 kanatlı, diğeri 12 kanatlı olsun. Hangisi aynı rüzgârda hızlı bir şekilde büyük güç üretir? Rotor süpürme alanı ve hızı aynı. Teorikte her iki rotor da aynı gücü üretmelidir. Biz 3 kanatlıdan çok, 12 kanatlıdan büyük güç bekleyebiliriz. Bununla birlikte çok kanatlı rotorda aerodinamik kayıplar fazladır. Bundan dolayı, aynı rotor alanı ve rüzgâr hızında, üç kanatlı rotordan daha büyük güç alabiliriz. Sonra, neden türbinlerde çok kanada ihtiyaç duyarız? Su pompalama gibi bazı uygulamalarda yüksek başlama momenti gerekir. Böyle sistemler için, başlangıç momenti çalışma momentinin 3-4 katına çıkar. Başlangıç momenti dayanıklı bir şekilde artar. Su pompaları, rüzgâr değirmenleri çok kanatlı rotolardan yapılmıştır. Temel olarak rüzgâr alma yönüne göre YERT'leri; rüzgârı önden alan ve arkadan alan türbinler olarak sınıflandırabiliriz. Bu türbinlere ait şekiller, Şekil 2.5' de görülmektedir.



Şekil 2.5 Rüzgâr Alma Yönüne Göre YERT' ler

Rüzgârı önden alan türbinler, rüzgârı doğrudan karşıdan alan rotora sahiptir. Rüzgâr akışı önce rotordan geçer, bunlar direğin engelleme sorununa sahip değildir. Bununla birlikte rüzgârı daima cephesinden alması için, rotasında tutmak gerekir. Diğer taraftan, rüzgârı arkadan alan makinalar daha esnek olup yönlendirici mekanizması gerektirmez. Ancak rotor, direğin rüzgâr almaya kısmına konduğundan kanatlara giden rüzgârın bir kısmı kule tarafından gölgelenir.

### 2.2.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde (DERT) dönüş eksenini, zemine ve rüzgâr yönüne hemen hemen diktirler. DERT' ler rüzgârı her yönden alabilirler. Bundan dolayı yönlendirme azaltılabilir. Generatör ve dişli kutusu gibi sistemler zemine bulundurulabilir, ki buda kule tasarımını basit ve çok ekonomik yapar. Bundan başka bu türbinlerin, bakımları zemine seviyesinde yapılabilir. Bu sistemler, senkron uygulamalar için kullanıldığında adım kontrolü gerektirmez. DERT' lerin en büyük sakıncası, genellikle kendiliklerinden başlayamamalarıdır. Bu türbin durduktan sonra, türbini çalıştırmak için ilave mekanizmaya gerek duyulur. Rotor dönmesini tamamlarken kanatlar sistemin verimini düşürmeye yol açacak ölü bölgelerden aerodinamik olarak geçmek zorundadır. Eğer sistem düzgün olarak kontrol edilmezse, kanatların yüksek

hızlarda tehlikeli bir şekilde dönmesi sonucu, sistemin çökme tehlikesi vardır. Ayrıca, pratik zorluklara maruz kalan direk yapılarını desteklemek için gergi tellerine ihtiyaç duyulur. Bazı büyük düşey eksenli tasarımların özellikleri aşağıda incelenmiştir.

#### 2.2.2.1. *Darrieus Rotor*

Mucidi Darrieus Georges Jeans Darrieus tarafından Darrieus Rotor, bir airfoil setinden üretilmiş kaldırma kuvvetinden dolayı çalışır. Darrieus rotorlu rüzgâr türbini Şekil 2.6' da görülmektedir.



Şekil 2.6 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini [21]

Orjinal tasarımda kanatlar, yumurta çırpıcı veya dönen halat gibi şekillendirilir ve çalışma sırasında gerilim altındadır. Bu tipik kanat yapısı, kanatların maruz kaldığı bükülme stresini minimize etmeye yardım eder. Genellikle Giromills olarak adlandırılan, düzgün düşey kanatlı Darrieus tasarımında birçok değişiklik mevcuttur.

Darrieus rotor genellikle, rüzgârdan enerji üretmek için cazip olan, yüksek uç hızı oranında çalışır. Halbuki bunlar kendileri çalışmaya başlayamaz ve gerekli hızda enerji üretmeye başlamak için harici bir uyartıma ihtiyaç duyarlar. Bunun yanında rotor sadece devir başına iki kat maksimum tork üretir.

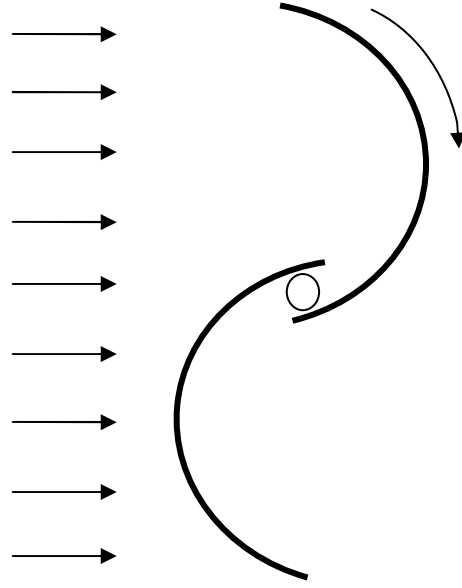
### 2.2.2.2. Savonius Rotor

S. J. Savonius tarafından icat edilen Savonius rüzgâr türbini, S şeklinde düzenlenmiş, iki yarım silindirel veya eliptik kanatlardan oluşan düşey eksenli rotorun prensip şeması Şekil 2.7' de görülmektedir.



Şekil 2.7 Savonius Rotorlu Rüzgâr Türbini [22]

Yarım silindirelerden birinin dışbükey kenarı ve diğerinin içbükey kenarı Şekil 2.8' de görüldüğü gibi zamanla rüzgâra maruz kalır. Savonius rotoru harekete geçiren kuvvet çekme kuvvetidir. İçbükey yüzeye etki eden sürüklenme kuvveti, dışbükey yüzeye etki edenden daima daha çoktur. Rüzgâra maruz kalan yani içbükey silindire etkiyen kuvvet, diğer kenara etki edenden çok olması nedeni ile rotor dönmeye zorlanacaktır. Bazen 90° açılı, biri diğerinin üzerine bağlanan iki ya da daha fazla rotor, dönme sırasında torkun dalgalanmasını düzenlemede kullanılır. Performansı arttırmanın diğer bir yolu, rotorlu deflektör arttırıcılarını eklemektir. Bu perdeler rüzgâra maruz kalan yani dışbükey yüzeyini gölgeler ve yarım silindirin içbükey yüzeyine akıyı yönlendirir, böylece performans artar. Çekme prensibiyle çalışanlar arasında, Savonius rotor oldukça düşük güç etkisine sahiptir. Ancak, bazı deneysel rotorlar, % 35' e kadar güç katsayısı değerine sahiptirler. Bu rotorlar yüksek derecede dayanıklıdır ve bunun sonucu olarak başlangıç momenti yüksektir.



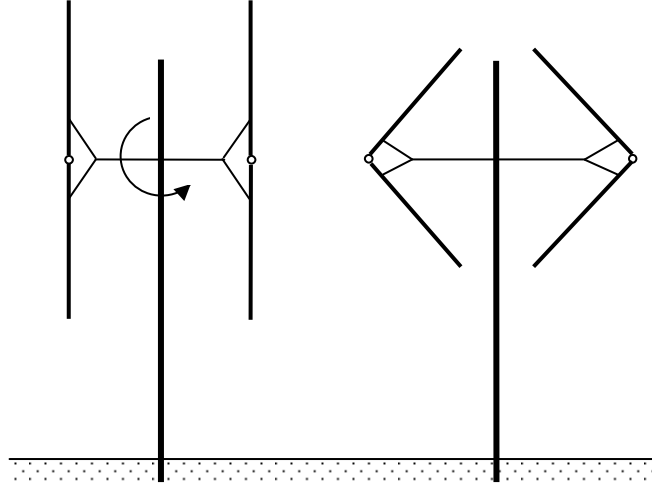
Şekil 2.8 Savonius Rotorunun Çalışma Prensibi

Bu rotorlar maksimum 1 civarında düşük hız oranlarında çalışırlar. Bunların yapımı çok basittir, hatta bunları uzunlamasına iki yarım şeklinde kesilmiş petrol varilinden yapılabilir. Bundan dolayı su pompası gibi, yüksek moment ve düşük hızlı uygulamalar için tercih edilirler.

### 2.2.2.3. Musgrove Rotor

Musgrove rotor, İngiltere’ de profesör Musgrove’ un araştırmacı ekibi tarafından geliştirilmiştir. Bu rotor basit olarak, H şeklinde şekillendirilen kanatlar ile merkezi şafta sahip olan düşey eksenli bir makinedir ve Şekil 2.9’ da görülmektedir. Yüksek hızlarda rotor kanatları, merkezkaç kuvvetinden dolayı yatay bir nokta etrafında döner. Bu durum kanatlar ve yapı üzerindeki daha yüksek aerodinamik kuvvetlerin riskini ortadan kaldırır. Harekete geçen Aerodinamik kuvvet temel alındığında rüzgâr türbinleri kaldırma ve çeken makineler olarak sınıflandırılmıştır. Ağırlıklı olarak kaldırma kuvveti ile çalışanlar kaldırma türbinleri, çekme kuvveti ile çalışanlar çekme türbinleri olarak adlandırılır. Bu türbini çalıştırmak için kaldırma kuvvetinden yararlanmak daima avantajlıdır. Rüzgâr türbinleri; birkaç kW’ tan birkaç MW’ a kadar değişen çeşitli hacimlerde mümkündür.

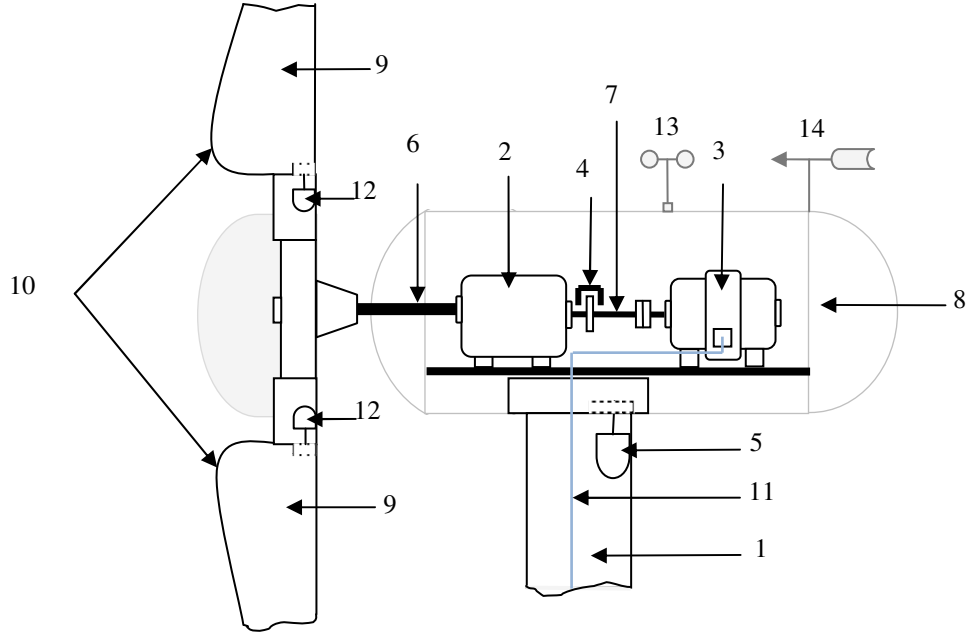
Büyüklik temel alındığında, 25kW' a kadar olanlar küçük, 25-100 kW arası orta, 100-1000 kW arası büyük ve 1000 kW' tan büyük olanlar da çok büyük olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 2.9 Musgrove Rotorunun Çalışma Prensibi

### 2.3. RÜZGÂR TÜRBİNİNİN YAPISI

Gelişmiş bir rüzgâr türbini genel olarak; rotor, kule ve kabin olmak üzere üç temel bölümde incelenebilir. Rotor; bir mil, kanatları tutan başlık, türbin kanatları ve kanatları yönlendiren mekanizmadan meydana gelmiştir. Kule; türbini ayakta tutan veya taşıyan kısımdır ve içerisinde kontrol ve enerji kabloları geçer. Türbin kabini, türbinin en yoğun ve içerisinde; rotor mili, dişli kutusu, generatör mili, generatör, fren sistemi, kabini yönlendiren mekanizma, kontrol ünitesi, rüzgâr hızı ve yönünü ölçen aletler bulunan kısımdır.



Şekil 2.10 Rüzgâr Türbininin Bölümleri

Şekil 2.10' da rüzgâr türbininin bölümleri görülmektedir. Burada;

- 1 numara kuleyi,
- 2 numara dişli kutusunu,
- 3 numara generatörü,
- 4 numara fren sistemini,
- 5 numara türbin kabinini döndüren sistemi,
- 6 numara rotor milini,
- 7 numara generatör milini,
- 8 numara türbin kabinini,
- 9 numara kanatları,
- 10 numara rotoru,
- 11 numara enerji kablosunu,
- 12 numara kanatları yönlendiren sistemi,
- 13 numara anemometreyi ve
- 14 numara rüzgâr gülünü göstermektedir.

### **2.3.1. Kule**

Rüzgâr türbinlerinde genel olarak kafes ve boru tipi olmak üzere iki çeşit kule kullanılmaktadır. Kafes kule yapımı ve montajı kolay maliyeti düşüktür. Küçük güçlü sistemlerde tercih edilir. Boru kule yapımı ve montajı daha zor ve maliyeti yüksektir. Boru kule büyük güçlerde tercih edilir. Bu kulenin içi kabloları tesis etmek ve teknisyenlerin merdiven olarak kullanmasına uygun olarak yapılır. Kulelerin temeli ve montajı sistemin sağlamlık ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir.

### **2.3.2. Dişli Kutusu**

Rotor milindeki enerji, generatöre bir dişli sistemi ile hızlandırılarak aktarılır. Dişli sistemi, rotor milinin devir sayısını generatörün ihtiyaç duyduğu devir sayısına çıkarır. Örneğin Nordex firması tarafından üretilen N 54 adlı, 1000 kW nominal güçlü rüzgâr türbinlerinde dişli kutusunun çevrim oranı 1:70' dir. Bu türbinlerin generatörlerinde, rüzgâr hızına göre otomatik olarak devreye giren 6 ve 4 kutup söz konusudur. 6 kutbun devrede olması durumunda, rotor milinin dakikadaki devir sayısı 14, generatör milinin dakikadaki devir sayısı 1000 ve türbin gücü 200 kW olurken; 4 kutbun devrede olması durumunda, rotor milinin dakikadaki devir sayısı 22, generatör milinin dakikadaki devir sayısı 1500 ve türbin gücü 1000 kW olmaktadır. Bazı türbinlerde ise otomatik olarak çevrim oranları değişen dişli kutusu kullanılmaktadır. Otomatik şanzımana benzeyen bu dişli kutusu bir kontrol sistemi tarafından rüzgârın hızına göre kumanda edilir.

### **2.3.3. Generatör**

Rüzgâr türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde; DA generatörü, senkron generatör ve asenkron generatör olmak üzere üç çeşit generatör kullanılmaktadır. Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan DA generatörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu generatörler, eviriciler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve

asenكرون generatörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

### **2.3.3.1. Doğru Akım Generatörleri**

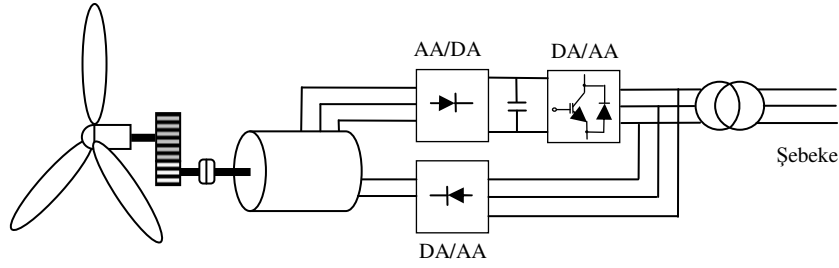
DA makinaları, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmesi gibi sakıncalarına rağmen, hız kontrollerinin kolay olması nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. DA generatörleri küçük kapasiteli rüzgâr türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedirler. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü DA makinaları, komütatörü elimine etmek için daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım (AA) yarı iletken doğrultucular yardımıyla DA' a dönüştürülür. Fırçasız DA makinaları olarak da isimlendirilen bu makinalar, daimi mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadırlar.

### **2.3.3.2 Senkron Generatörler**

Senkron generatör (SG), harici bir yükü besleyen üç fazlı sargıların oluşturduğu bir stator ve manyetik alanı oluşturan bir rotordan meydana gelir. Rotorun oluşturduğu manyetik alan ya daimi mıknatıslardan ya da sargılardan akan DA' dan üretilir. SG sabit hızlı sistemler için daha uygundur. Bu nedenle sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışırlar. Rüzgâr türbinlerinde, genellikle alan sargılı ve daimi mıknatıslı olmak üzere iki tip SG kullanılmaktadır.

#### **2.3.3.2.1 Alan Sargılı Senkron Generatör**

Alan sargılı senkron generatörlerde (ASSG); stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç çeviricisi üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Şebekeye bağlı bir ASSG Şekil 2.11' de görülmektedir.



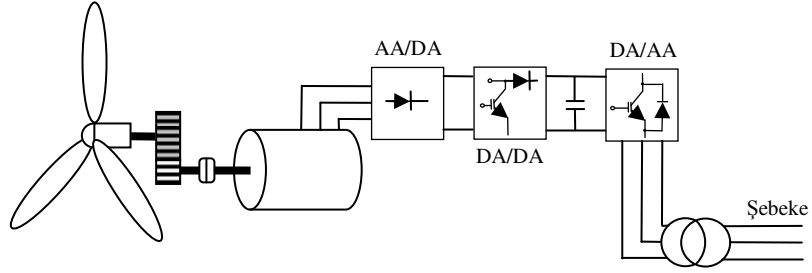
Şekil 2.11 Değişken Hızlı Alan Sargılı Senkron Generatör

Stator tarafındaki çevirici elektromanyetik momenti, şebeke tarafındaki çevirici ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder. ASSG' ün avantajları şunlardır:

- Elektromanyetik moment üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için bu makinanın verimi genellikle yüksektir.
- Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı birçok işletim durumunda minimize edilebilir.
- Bu generatörlerin kutup eğimi asenkron makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu elimine edilerek, düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir.

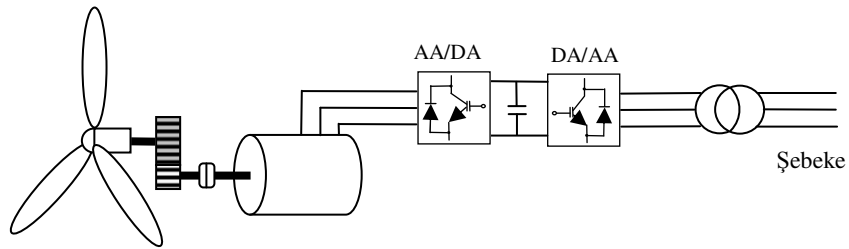
Rotorda sargı devresinin bulunması daimi mıknatıslı senkron generatör (DMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgâr gücünün 1.2 katı büyüklüğünde çeviriciler kullanılması gerekmektedir.

### 2.3.3.2.2. Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör



Şekil 2.12 Yükseltici DA-DA Kıyıcısı ile Beslenen Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör

Şekil 2.12’ de üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimi mıknatıslı senkron generatöre (DMSG) ait rüzgâr güç sistemi görülmektedir. Burada yükseltici DA-DA kıyıcısı elektromanyetik momenti kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki çevirici ise, girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi, aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu konfigürasyon küçük güçlü (50 kW ’ tan küçük) rüzgâr güç sistemleri için tercih edilmektedir.



Şekil 2.13 DGM Çeviriciden Beslenen Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör

Şekil 2.13’ de farklı bir DMSG rüzgâr güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde generatör ve DA linki arasında DGM tekniğini kullanan doğrultucu yerleştirilmiştir ve DGM çevirici üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin Şekil 2.11’ deki sisteme göre üstünlüğü; generatör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltmak için, optimal çalışma noktasına yakın bir çalışmaya müsaade edilen alan yönlendirmeli kontrolün

kullanılmasıdır. Ancak sıcaklık ve frekansla değişebilen generatör parametrelerinin performansı etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

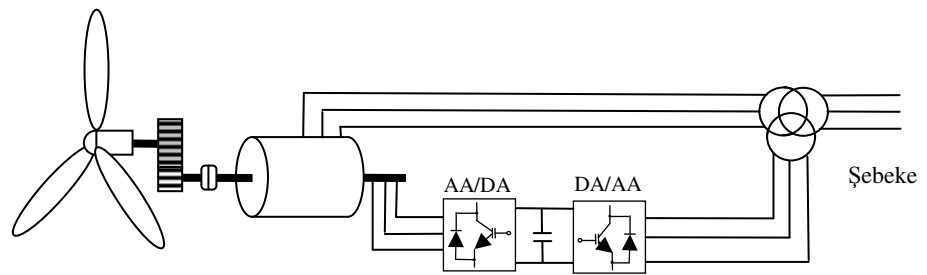
DMSG ' nin sakıncaları şunlardır:

- Makinanın fiyatını arttıran daimi mıknatısların maliyeti yüksektir.
- Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır.
- Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir.
- Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir.

### 2.3.3.3. Asenkron Generatörler

Rüzgâr türbinlerinde, AA üretmek için üç fazlı asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu tip generatörler rüzgâr türbin endüstrisi ve küçük hidroelektrik santraller dışında yaygın bir şekilde kullanılmamaktadırlar. Rüzgâr türbinlerinde asenkron generatörlerin tercih edilmelerinin sebebi, bakım gerektirmeyişi, emniyetli olmaları ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Rüzgâr türbinlerinde, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tip asenkron generatör kullanılmaktadır.

#### 2.3.3.3.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör



Şekil 2.14 Çift Beslemeli Rotoru Sargılı Asenkron Generatör

Şekil 2.14' de çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) kullanıldığı bir rüzgâr güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet back-to-back gerilim kaynaklı DGM tekniğini kullanan eviriciden oluşan, dört bölgeli güç çeviricisi üzerinden şebekeye bağlanmıştır.

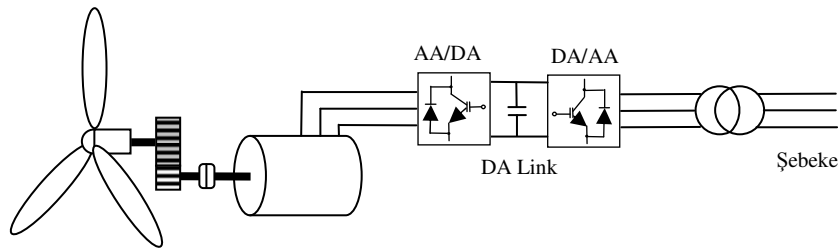
Genellikle, rotor tarafındaki çevirici kontrol sistemi, elektromanyetik momenti regüle eder ve makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki çevirici kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder. Senkron generatörlerle karşılaştırıldığında, ÇBAG' ün aşağıda belirtilen bazı üstünlükleri vardır.

- Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan çevirici sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık % 25' i oranında bir evirici kullanılmaktadır. Bu da evirici maliyetini azaltır.
- Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.' lik kısmı için gerekli olduğundan, evirici filtrelerinin maliyeti azalmaktadır. Aynı zamanda evirici harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir.
- Ayrıca bu makina harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir.

ÇBAG için en büyük sakıncası bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunmasıdır.

### 2.3.3.3.2. Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Rüzgâr güç sistemlerinde kullanılan bir başka generatör ise, Şekil 2.15' te görülen sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)' dür.



Şekil 2.15 Değişken Hızlı Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Bu sistemde stator sargısı, DA linkinin iki tarafına back-to-back bağlı gerilim kaynaklı iki DGM eviriciden meydana gelen, dört bölgeli güç çeviricisi üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki çeviricinin kontrol sistemi, elektromanyetik momenti regüle

eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki çevirici, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder. Rüzgâr güç sistemlerinde kullanılan SKAG' nin sağladığı avantajlar aşağıda verilmiştir:

- Sincap kafesli asenkron makinalar, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar.
- Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyartım oluşturabilmektedir.
- Evirici, harmonik kompanzator olarak çalıştırılabilmektedir.

Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklaştırması ve stator tarafındaki çeviricinin, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre % 30-% 50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır. Ayrıca yukarıda anlatılan generatörlerin dışında; fırçasız çift beslemeli generatörler, değişken relüktanslı generatörler ve çift hızlı asenkron generatörler de bazen, rüzgâr güç sistemlerinde özel uygulamalar için kullanılmaktadırlar [23].

#### **2.3.4. Fren Sistemi**

Rüzgârdaki gücün artışı çok hızlı olduğundan, bütün rüzgâr türbinleri yüksek hızlarda güç toplamalarını önleyecek düzenlemeler ile donatılırlar. Yüksek hız koşullarında güç denetimi amacıyla belli başlı üç yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; aerodinamik verimin değiştirilmesi, kanatların rüzgâr ile etkileşim içinde olduğu alanı küçültmek ve frenleme olarak sıralanır.

Aerodinamik verim, kanat acısını değiştirmek veya kanatları döndürerek kaldırma etkilerini azaltıp sürüklenme etkilerini çoğaltarak değiştirilir. Kanatların rüzgâr ile etkileşim içinde olduğu alanı küçültmek, rotoru hakim rüzgâr yönünden çevirerek ve rotor geometrisini değiştirerek sağlanır. Frenleme ise mekanik fren, hava freni ve Elektrik freni ile sağlanır. Mekanik fren pnömatik, hidrolik veya elle kumanda edilen balata sisteminden ibarettir. Elektrik freni, generatörün yüklenerek frenleme bölgesinde çalıştırılması ile sağlanır. Bu yöntemler tek, tek ya da yüksek hız kontrolü ve yük denetim kaybı durumlarında kombine olarak bir arada kullanılabilir.

### 2.3.5. Rotor

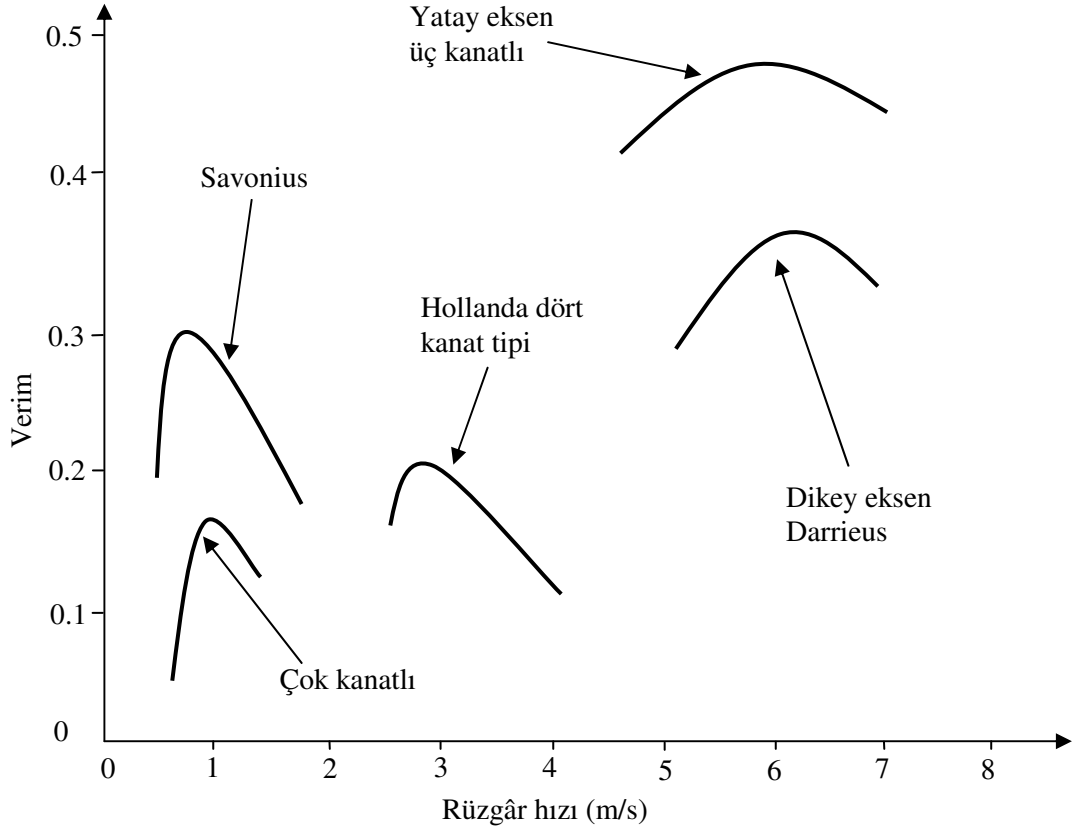
Rotor, türbinin rüzgârı karşıladığı ve rüzgârın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürdüğü en dikkat çekici bölümüdür. Bir mil üzerinde tesis edilmiş başlık ve başlığa monte edilmiş kanatlardan oluşmuştur. Kanatları rüzgârın hızına göre belli açıda çeviren düzenek başlık üzerine monte edilmiştir. Başlığın ön bölümü rüzgârı iyi bir şekilde yönlendirmesi için uçak pervanelerinininkine benzetilmiştir. Türbinin kanatları rüzgârı iyi alabilmeli, sağlam ve esnek olmalıdır. Rüzgâr türbinlerinin kanatları; alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern rüzgâr türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler. Çelikten üretilen kanatların bükülmeye karşı dayanımı çok iyidir. Fakat yorulma dayanımları ve korozyon sorunu yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır. Cam elyafının kopma mukavemeti,  $420 \text{ N/mm}^2$  ile St 52 çeliğinin kopma mukavemeti  $520 \text{ N/mm}^2$  ye yakındır. Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise,  $550 \text{ N/mm}^2$  ile çelikten daha iyidir. Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün  $15 \text{ kN/mm}^2$  ile çeliğe nazaran ( $210 \text{ kN/mm}^2$ ) çok düşük olmasıdır. Bu nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyafı yerine, elastisite modülü  $44 \text{ kN/mm}^2$  olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır. Fakat bu malzemede pahalıdır.

### 2.4. RÜZGÂRDAN MAKSİMUM ENERJİ ELDE EDİLMESİ

Güç transfer eden bütün sistemlerde temel amaç en yüksek verimle gücü aktarmaktır. Rüzgâr türbinlerinde öncelikle mevcut rüzgâr gücünü yakalamak ve rotora aktarmak ön plana çıkmaktadır.

### 2.4.1. Değişken Rotor Hızının Önemi

Hatırlanacağı üzere rotor verimi  $C_p$ , kanat ucu hız oranının (KUHO) bir fonksiyonudur. Modern rüzgâr türbinlerinin verimli işletimleri, KUHO değerleri 4–6 civarında olduğunda oluşur. Başka bir deyişle kanat uç hızı rüzgâr hızının 4–6 katı civarında ise bu tür türbinler verimli olarak işletilirler. İdealde maksimum verim türbin kanat hızının rüzgâr hızı değişimi ile sürekli olarak ayarlanması durumunda elde edilir. Örneğin Şekil 2.16’ da farklı türbinlerin dönme hızına ilişkin verim-rüzgâr hızı değişimini göstermektedir.



Şekil 2.16 Değişik Türbin Verimlerinin Rüzgâr Hızına Göre Değişimi [20]

Şekil 2.16’ da görülen grafiklerden çok kanatlı rüzgâr türbinlerinin veriminin en az olduğu, dört kanatlı Hollanda tipi türbinin daha verimli olduğu, Savonius türbininin ve dikey eksenli Darrieus türbininin onlardan daha iyi bir verime sahip olduğu, yatay eksenli üç kanatlı türbinin ise en iyi verime sahip olduğu görülmektedir.

## 2.4.2. Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sürücü Sistemleri

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerin çoğunda güç elektroniği teknikleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde üretilen enerjinin istenen forma çevrilmesi ve belirlenen kontrol mantığı çerçevesinde rüzgârdan optimum enerji elde edilmesi amaçlanmaktadır [13].

### 2.4.2.1. Tek Sabit Hızlı Sürücü

Elektrik generatörü nispeten daha yüksek hızlarda verimli çalışmasına rağmen, türbin hızı genelde düşüktür. Bu ikisi arasında hız farkı, mekanik dişli kutusu ile kompanze edilmeye çalışılır. Tek sabit hızlı rüzgâr generatörleri sabit hızda işletilir. Yıllık enerji üretimi rüzgâr hızına ve dişli oranına bağlıdır.

### 2.4.2.2. İki Sabit Hızlı Sürücü

Hız, dişli oranının değiştirilmesi ile değiştirilir. Yıllık enerji miktarını optimize eden iki tane işletim hızı vardır. Yıllık enerji üretimi dişli oranı ve rüzgâr hızına bağlıdır. İlk dizaynlarda bunun için iki ayrı generatör kullanılıyordu ve bir kemer yardımı ile iki generatör arasında anahtarlama yapılıyordu. Ama daha ekonomik- verimli bir yöntem iki ayrı hızda çalışabilecek asenkron generatör dizayn etmektir. Burada iki farklı döner kutup oluşturacak şekilde stator sargılarının iki ayrı sargı grubundan oluşturulması sağlanmalıdır. Bunun için iki ayrı sargı oluşturabileceğimiz gibi tek bir sargının farklı kutup sayılar verecek şekilde bağlantısının değiştirilmesi ile elde edilir. Bu yöntemde kutup değiştirme yöntemi denmekte olup tek bir stator sargısı yardımı ile P veya 2P sayıda kutup oluşturulabilir. Asenkron generatör düşük rüzgâr hızlarında yüksek kutup sayısında çalıştırılır. Böylece optimum güç katsayısı elde edilemeye çalışılır. Bu durumda maksimum değiştirme oranı 2:1' dir. Stator sargıları bağlantı yapısı sargıların “seri- seri” veya “seri- paralel” bağlanması ile elde edilir.

### **2.4.2.3. Değişken Hızlı Dişli Ünitesi**

Bazı rüzgâr türbinleri iki farklı dişli kutusuna sahiptir. Her bir dişli kutusu ayrı bir generatörü sürer. Dişli kutuları;

- Düşük rüzgâr hızı için dişli oranı ve generatör
- Yüksek rüzgâr hızı için dişli oranı ve generatör

Bu tür sistemler geçmişte kullanılmıştır, ancak yarardan çok problem oluşturmuştur. Bu nedenle günümüzde dişli üniteleri kullanan değişken hız sürücüleri kullanılmamaktadır.

### **2.4.2.4. Güç Elektroniği Elemanları Kullanan Değişken Hız Sürücüleri**

Modern değişken hız sürücüleri güç elektroniği elemanlarını kullanarak generatör çıkışındaki değişken gerilim ve frekansı, sabit gerilim ve frekans çıkışına çevirirler. Klasik olarak silikon kontrollü doğrultucular ile birlikte eviriciler kullanılabilirdiği gibi, modern tasarımlarda daha çok pwm tristör tercih edilmektedir. Teorik olarak hız oranında bir sınırlama olmamasına karşılık, bu oran pratik olarak 3:1 oranını geçmez. Değişken hız sisteminin enerji yakalaması nispeten yüksek olmasına rağmen ilave maliyet ve güç elektroniği devrelerindeki kayıplar bu avantajı belirli oranda dengeler. Ayrıca bu tür sistemler enerji kalitesizliğine neden olabilir.

## **2.5. ASENKRON MAKİNALAR**

Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde bazı avantajlarından dolayı asenkron makinaların kullanıldığını belirtmiştik. Bir asenkron makina endüktif akım verebilen bir şebekeye bağlandığında stator sargılarında döner alan oluşur ve makinanın rotoru döner alan ile aynı yönde ve daha küçük hızla döner. Bu şekildeki çalışmaya asenkron motor olarak çalışma denir ve motor şebekeden aldığı elektrik enerjisini milinden mekanik enerji olarak verir. Döner alan hızına senkron hız da denir ve eşitlik 2.15 ile hesaplanabilir.

$$n_s = \frac{120f}{2P} \quad (2.15)$$

Burada;  $n_s$  d/dk cinsinden döner alan devir sayısını,  $f$  Hz cinsinden frekansı ve  $2P$  de kutup sayısını belirtmektedir. Motor devir sayısı ya da rotor devir sayısı olarak bilinen  $n_R$  ile  $n_s$  arasındaki farka da kayma denir ve  $s$  ile gösterilir.

$$s = \frac{n_s - n_R}{n_s} \quad (2.16)$$

Asenkron motorun rotoru dışarıdan bir sürücü ile döner alan ile aynı yönde ve aynı hızda döndürülürse rotor sargılarında bir gerilim indüklenmez. Bu durumda kayma sıfırdır ve bu çalışmaya ne motor ne de generatör denebilir.

Asenkron makinayı dışarıdan bir sürücü ile döner alan ile aynı yönde fakat daha hızlı döndürelim. Bu durumda makina milinden aldığı mekanik güç ile stator sargılarından bağlı olduğu şebekeye elektrik enerjisi verir. Böylece makina generatör olarak çalışmış olur [14].

### 2.5.1. Kendiliğinden Uyarımlı Asenkron Generatör

Yapı bakımından hiçbir farkı olmayan asenkron makinalar istenirse motor istenirse generatör olarak kullanılabilir. Asenkron motorlar; rotor sargısına göre, sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron motor olarak, faz sayısına göre de bir fazlı, iki fazlı, üç fazlı ve çok fazlı olarak sınıflandırılırlar.

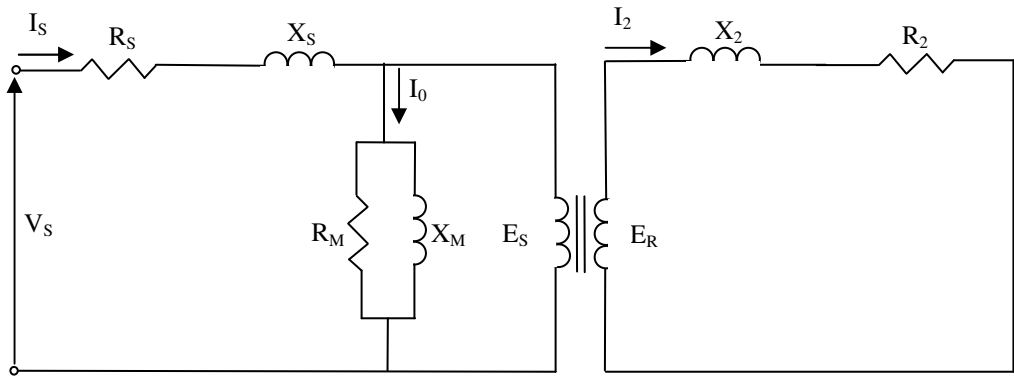
### 2.5.2. Asenkron Generatörün Çalışma Prensibi

AG'ün çalışması veya gerilim üretmesi için, dışarıdan rüzgâr türbini veya buhar türbini gibi bir sürücü ile senkron hızın üstünde döndürülmesi ve mıknatıslanma akımını sağlayacak bir şebekeye bağlanması gerekir [24]. Bu durumda AG ihtiyacı olan mıknatıslanma akımını şebekeden temin eder.

Eğer AG şebekeden bağımsız olarak çalıştırılacaksa; yine bir sürücü ile senkron devirde döndürülmeli, stator sargılarında artık mıknatıslık olmalı ve uçlarına uygun değerde seçilmiş kapasitör bağlanmalıdır. Bu durumda generatör gerilim üretir mıknatıslanma akımını da kapasitörden temin eder. AG' ün bu şekilde çalıştırılmasına kendiliğinden uyarım denir.

### 2.5.3. Asenkron Makinanın Matematik Modeli

Rotorunun dönmesi engellenip stator sargılarına küçük bir gerilim uygulanan asenkron makina aynen bir transformatöre benzer. Böyle bir asenkron makina için bir fazın eşdeğer devresi Şekil 2.17' deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.17 Rotoru Kilitli Asenkron Motorun Bir Fazının Eşdeğer Devresi

Şekil 2.17' de  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $V_s$  ve  $I_s$  sırasıyla stator direnci, stator kaçak reaktansı, statora uygulanan faz gerilimi ve stator akımıdır.  $R_2$ ,  $X_2$ ,  $I_2$  değerler ise sırasıyla rotor direnci, rotor kaçak reaktansı ve rotor akımıdır.

Asenkron motorun rotoru kilitli iken statoruna sıfırdan başlayıp anma akımını çekinceye kadar gerilim artırılıp bu durumda gerilim, akım ve güç değerleri ölçülerek motorun eşdeğer direnci 2.17' deki eşitlikten hesaplanır.

$$R_e = \frac{P}{I_s^2} \quad (2.17)$$

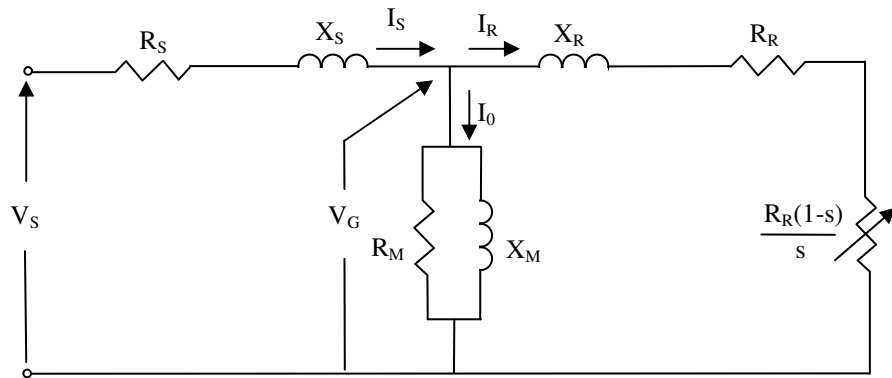
Eşdeğer direnç eşitlik 2.18' de gösterildiği gibi stator direnci ile stator tarafına dönüştürülmüş rotor direncinin toplamına eşittir. Çoğunlukla bu iki direnç eşit kabul edilerek hesaplamalar yapılır.

$$R_e = R_S + R_R \quad (2.18)$$

Stator ile rotor arasında transformatörlerde olduğu gibi bir dönüştürme oranı mevcuttur. Buna a dersek stator ve rotor elektromotor kuvvetleri (emk) arasında eşitlik 2.19 yazılır.

$$a = \frac{E_R}{E_S} \quad (2.19)$$

Asenkron makina ile ilgili hesaplar genelde büyüklüklerin bir tarafa transfer edilmesi ile yapılır. Şekil 2.18' de stator tarafına transfer edilmiş değerlere göre asenkron motor eşdeğer şeması görülmektedir.



Şekil 2.18 Stator Tarafına Dönüştürülmüş Asenkron Motor Eşdeğer Devresi

$R_R$ ,  $X_R$ ,  $I_R$  stator tarafına dönüştürülen rotor direnci, rotor kaçak reaktansı ve rotor akımını,  $s$  ise kaymayı göstermektedir. Asenkron makinanın milinden alınan mekanik güç ise  $\frac{R_R(1-s)}{s}$  ile gösterilmiştir.

Asenkron makinanın kayıpları, bakır kayıpları, demir kayıpları ve sürtünme ve rüzgâr kayıpları olarak sayılabilir. Stator sargılarının sebep olduğu bakır kayıpları eşitlik 2.20 ile hesaplanır.

$$P_{SCu} = I_S^2 R_S \quad (2.20)$$

Rotor sargılarının sebep olduğu bakır kayıpları eşitlik 2.21 ile hesaplanır.

$$P_{RCu} = I_R^2 R_R \quad (2.21)$$

Demir kayıpları, sürtünme ve rüzgâr kayıplarına sabit kayıplar da denir. Asenkron makinanın sabit kayıpları da eşitlik 2.22 ile hesaplanır.

$$P_S = \frac{V_G^2}{R_M} \quad (2.22)$$

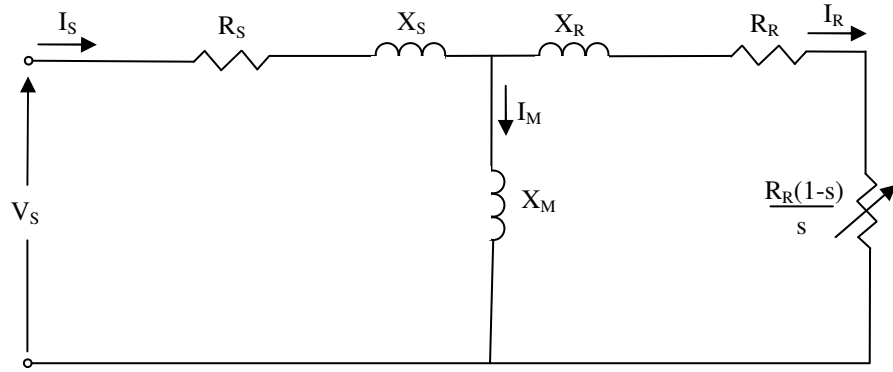
Makinanın faz başına toplam kayıpları, bu kayıpların toplanması ile eşitlik 2.23' den hesaplanır.

$$P_K = P_{SCu} + P_{RCu} + P_{StV} \quad (2.23)$$

Asenkron makinanın verimi, makinadan alınan gücün makinaya verilen güce oranı olarak tarif edilir ve eşitlik 2.24 ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{P_G - P_K}{P_G} = \frac{P_{\zeta}}{P_G} \quad (2.24)$$

Asenkron generatör olarak kullanılan makinanın yaklaşık eşdeğer devresi Şekil 2.19' da gösterilmiştir.

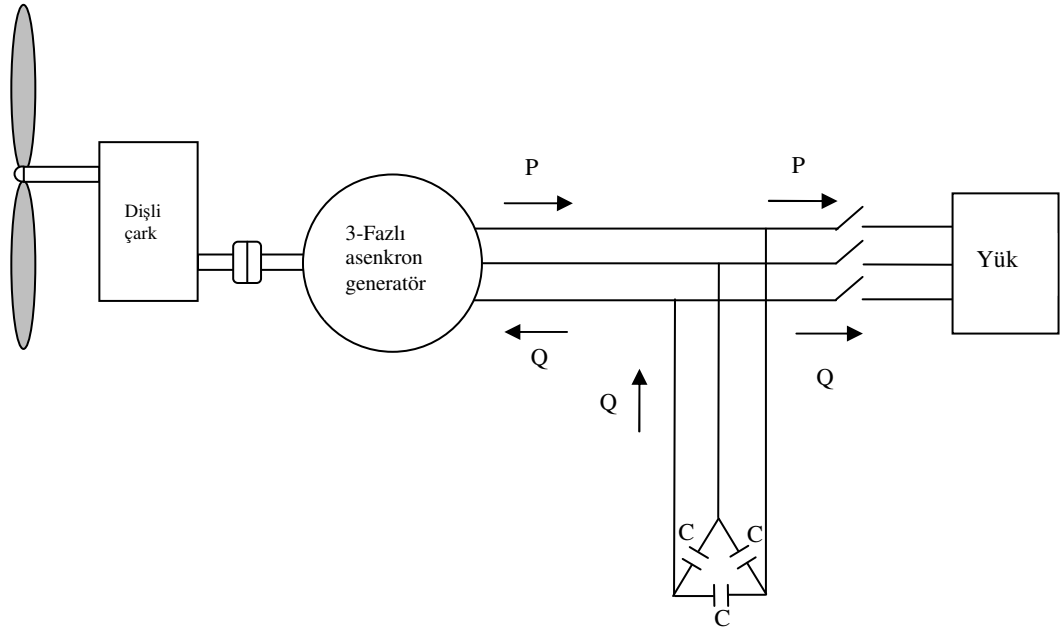


Şekil 2.19 Asenkron Motor Yaklaşık Eşdeğer Devresi

#### 2.5.4. Asenkron Generatörlerde Kendiliğinden Uyarım

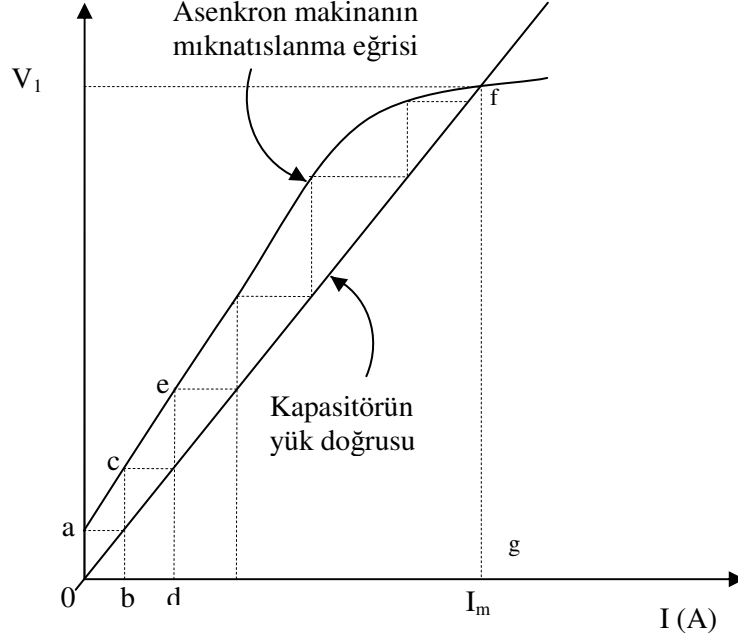
Stator sargı uçlarına kapasitör bağlanmış asenkron makinalar, kendinden uyarımlı asenkron generatör olarak adlandırılır. Şebekeden bağımsız çalışan AG için seçilecek kapasitör, öncelikle mıknatıslanma akımını karşılaması gerekir. Şekil 2.20’ de uçlarına kapasitör bağlanmış 3 fazlı asenkron generatör görülmektedir.

Asenkron generatörün uçlarında gerilimin oluşması aynı DC şönt dinamoda olduğu gibidir. İndüksiyon jeneratörün rotoru dışarıdan bir güç ile istenen devirde ve yönde döndürüldüğünde rotor çekirdeğindeki mevcut artık mıknatıslık küçük bir terminal voltajı üretir.



Şekil 2.20 Kapasitör Uyarımlı Asenkron Generatör

Eğer asenkron generatörün uçlarında, Şekil 2.20’ de olduğu gibi kapasitör bağlanmışsa bu gerilim şekil 2.21’ deki grafikten anlaşılacağı gibi “oa” ile gösterilir ve bu gerilim de kapasitörden bir “ob” akımı akıtır.



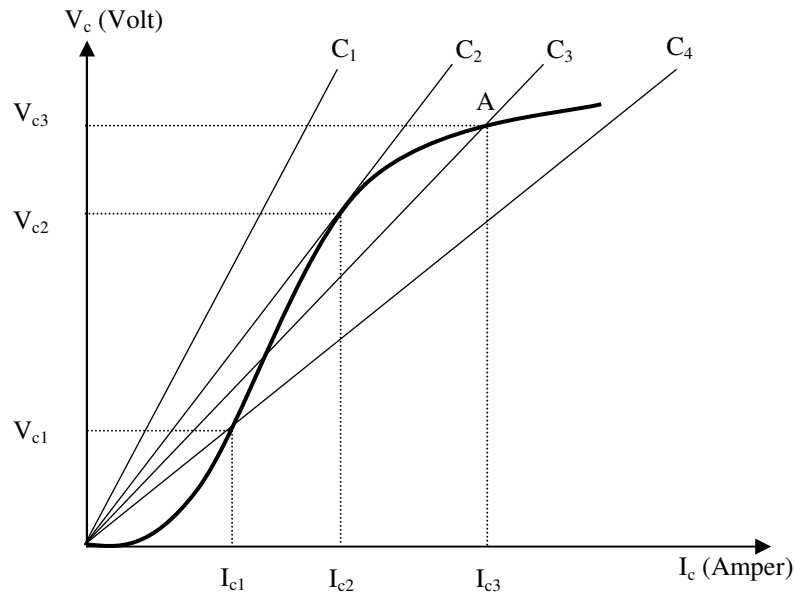
Şekil 2.21 Artık mıknatısa Sahip Asenkron Generatörde Kendiliğinden Uyartım

Bu ob akımı da aynen artık mıknatıslanma gibi bir mıknatıslanma oluşturur. Bu üretim döngüsü daha çok uç gerilimi ve daha çok mıknatıslanma üretilmesine sebep olur. Artan voltaj asenkron generatörün çekirdeği doyuncaya kadar devam eder ve daha sonra gerilimdeki yükselme azalarak mıknatıslanma eğrisi, kapasitör yük doğrusu ile f noktasında kesişir. Bu noktadaki gerilim generatörün nominal gerilimidir ve bu andaki “gf” büyüklüğündeki mıknatıslanma akımına  $I_{m1}$  diyebiliriz. Şekil 2.21’ de kapasitörün yük doğrusu;  $\tan^{-1}(1/\omega c)$  ile belirtilir.

Rotor çekirdeğinde artık mıknatıslık yoksa, asenkron generatör gerilim üretmeyecektir. Bu durumda, makinayı bir süre 3 fazlı asenkron motor olarak şebekede çalıştırıldığında rotor çekirdeğinde kalıcı mıknatıslık oluşur ve problem de çözülmüş olur.

### 2.5.5. Asenkron Generatör İçin Kapasitör Seçimi

Burada ilk planda boşa uyarımı sağlamak için minimum bir kapasiteye ihtiyaç vardır. Bu minimum kapasiteyi belirlemek için makinanın mıknatıslanma eğrisinden faydalanabiliriz. Şekil 2.22' de bir asenkron makina için mıknatıslanma eğrisi ile değişik kapasitörlerin akımlarındaki değişmeye karşılık gerilimlerdeki değişimi veren grafik verilmiştir.



Şekil 2.22 Asenkron Generatör Mıknatıslanma Eğrisi

Kapasitörün  $V_c = f(I_c)$  grafiği lineer, mıknatıslanma eğrisi ise bir değere kadar artmakta ve generatör çekirdeği doyuma yaklaştığında yatay bir seyir izlemektedir. Ölçekli olarak çizilen mıknatıslanma eğrisi üzerine şekil 2.22' de farklı kapasitör doğruları çizilmiştir. Kapasitör büyüklükleri  $C_1 < C_2 < C_3 < C_4$  şeklindedir. Bu doğrulardan  $C_3$  doğrusu A noktasında mıknatıslanma eğrisi ile kesişmekte ve bu anda anma gerilimi üretmektedir.  $C_3$  kapasitörü seçilmesi gereken kapasitördür. Generatörün yüksüz durumda terminal voltajı Şekil 2.22' deki A noktasından faydalanılarak hesaplanabilir [25].  $C_1, C_2$  yetersiz kapasite ve  $C_4$  ise aşırı kapasite özelliği göstererek kendi kendine uyarımı sağlayamaz. Değişen devir sayısı ve yüklenmeler karşısında generatörün mıknatıslanma eğrisinin eksenindeki kaymanın sonucunda sabit gerilim elde etmek için kapasitör değeri

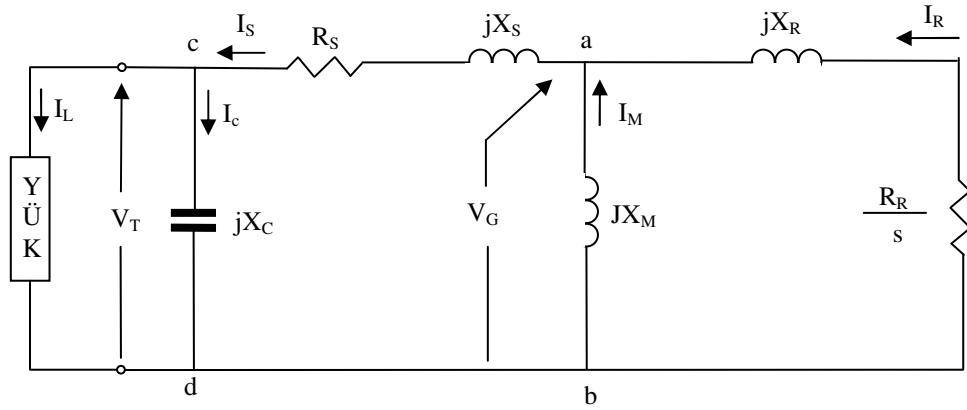
artırılmalıdır. Bunun da ulaşabileceği en fazla değere  $c_{\max}$  dersek, sabit uç gerilimi için kapasitör bu iki değer arasında ayarlanmalıdır.

### 3. ASENKRON GENERATÖRÜN SÜREKLİ DURUM ANALİZİ

Öncelikle bir asenkron motor seçilerek, makinanın boş çalışma ve kilitli rotor deneyleri yapıldı ve parametreleri elde edildi. Rotor değerleri de stator tarafına dönüştürülerek bir fazlı eşdeğeri elde edilmiştir. Stator sargı uçlarına uygun değerde kondansatör ve yük bağlanmış, bir fazlı kendinden uyarımlı başka bir deyişle kapasitör uyarımlı asenkron generatöre ait bir faz eşdeğer devreyi Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

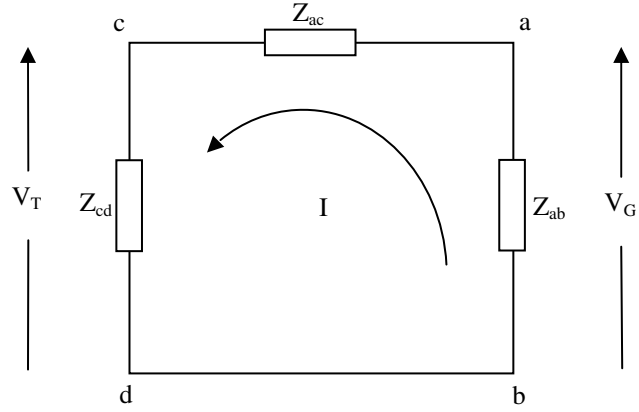
#### 3.1. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

Şekil 2.19' da eşdeğer devresi verilen asenkron motor uçlarına uyarım kapasitörü ve yük bağlandığında, Şekil 3.1' de görülen asenkron generatör eşdeğer devresini elde ederiz.



Şekil 3.1 Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatörün Bir faz Eşdeğeri

Şekil 3.1' de ab, ac ve cd aralığındaki empedansları eşdeğerleri şeklinde göstererek Şekil 3.2' yi elde ederiz.



Şekil 3.2 KUAG Eşdeğer Empedanslı Bir faz Eşdeğeri

Kapalı bir elektrik devresinde toplam gerilim sıfırdır prensibine göre eşitlik 3.1 elde edilir.

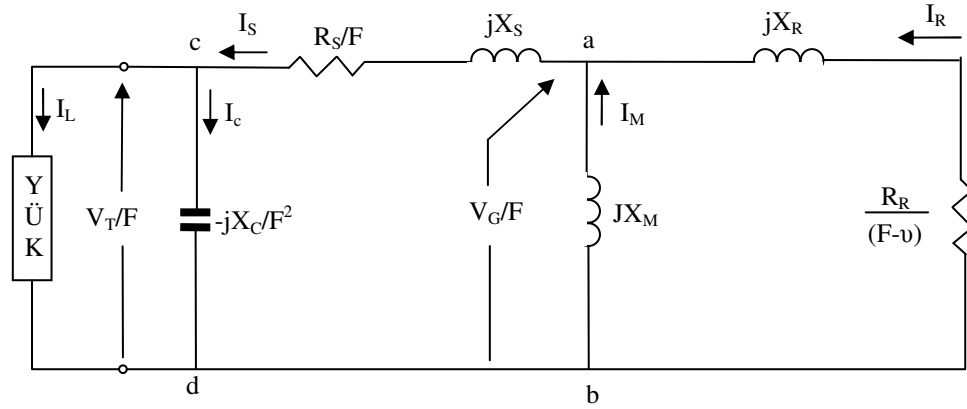
$$I_T Z_T = 0 \quad (3.1)$$

Burada  $Z_T$  kapalı devrenin toplam empedansıdır ve  $Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd}$  şeklinde ifade edilerek, eşitlik 3.2 elde edilir.

$$I_T (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd}) = 0 \quad (3.2)$$

Elektrik makinalarının hesaplamalarında, sağladığı bazı kolaylıklardan dolayı per unit (pu) birim sistemini tercih edeceğiz. Büyüklüklerin pu değerlerini elde etmek için, gerçek değerler, baz alınan değerlere orantılanmıştır. Asenkron generatörün değişen koşullarda frekansı ve manyetize edici reaktansı değişmektedir. Böylece bizim hesaplamamız gereken iki değişken,  $F$  ve  $X_M'$  dir. Şekil 3.1' deki devrede bütün reaktans ve gerilimleri  $F'$  ye bölerek daha kolay bir çözüm yapabiliriz.

Kendinden uyarımlı asenkron generatörün sürekli çalışma durumunu analiz etmek için Şekil 3.3' de görülen bir faz eşdeğer devresinden faydalanacağız.



Şekil 3.3 Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatörün Geliştirilmiş Bir faz Eşdeğeri

Burada;

$R_S, R_R$  = Stator ve rotorun (stator tarafına indirgenmiş) bir faz rezistansı,

$X_S, X_R$  = Stator ve rotorun (stator tarafına indirgenmiş) bir faz endüktif reaktansı,

$X_M$  = Manyetize edici reaktansı,

$X_C$  = Stator uçlarına bağlanmış kapasitörün bir fazının kapasitif reaktansı,

$V_T$  = Stator uçlarındaki gerilim,

YÜK = Faz başına yük,

$F, v$  = Sırasıyla p.u. frekans ve hız değerlerini göstermektedir.

Şekil 3.1' e göre, formül 3.2' de verilen;

$$Z_{ab} = \left[ \frac{R_R}{F - v} + jX_R \right] \parallel jX_M \quad (3.3)$$

$$Z_{ac} = \frac{R_S}{F} + jX_S \quad (3.4)$$

$$Z_{cd} = R_L + jX_L \parallel \left[ \frac{-jX_C}{F^2} \right] \text{ şeklinde ifade edilmektedir.} \quad (3.5)$$

Kendiliğinden uyartım altında hava aralığındaki gerilim ve dolayısıyla da generatör akımı sıfır olamayacağından, toplam empedans sıfıra eşit olur [26][27].

$$Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} = 0 \quad (3.6)$$

Kompleks bir eşitlik olan eşdeğer empedans, reel ve imajiner parçalardan oluşur. Dolayısıyla bu iki parçası da ayrı ayrı sıfıra eşittir.

$$\text{Re} (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{Im} (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd}) = 0 \quad (3.8)$$

generatör parametreleri, yük empedansı, kondansatör kapasitesi ve hız değerleri kullanılarak eşitlik 3.7 ve eşitlik 3.8' de yerine yazıldığında F ve  $X_M$  bilinmeyenlerine sahip iki bilinmeyenli iki denklem elde edilir. Bilinmeyen  $X_M$  ve F değerleri önce GA ile sonra da bu değerler başlangıç kabul edilerek Newton-Raphson yöntemi ile gerçek değerler hesaplanır. F ve  $X_M$  değerleri hesaplandıktan sonra makinenin deneyle elde edilen mıknatıslanma eğrisinden faydalanılarak  $V_G$  değeri elde edilir.

Bütün bu işlemlerin sonucunda F ve  $X_M$  değerleri hesaplandıktan sonra generatörün; akım, çıkış gerilimi ve güç gibi parametreleri aşağıda verilen formüllerle hesaplanır.

$$I_s = \frac{V_G}{F(Z_{ac} + Z_{cd})} \quad (3.9)$$

$$V_T = V_G \frac{Z_{cd}}{Z_{ac} + Z_{cd}} \quad (3.10)$$

$$I_R = \frac{V_G}{F\left(\frac{R_R}{F - \nu} + jX_R\right)} \quad (3.11)$$

$$I_L = \frac{JX_C I_S}{R_L F - JX_C} \quad (3.12)$$

$$P_G = I_R^2 \frac{R_R}{F - \mathcal{D}} \quad (3.13)$$

$$P_C = I_L^2 Z_L \quad (3.14)$$

### 3.2. LİNEER OLMAYAN DENKLEMLERİN ÇÖZÜMÜ

Bir denklemin kökleri  $f(x)=0$  şartını sağlayan  $x$  değerleri olarak tanımlanabilir. Bu nedenle denklemin köklerine, denklemin sıfırları da denebilir. Bu durumda klasik yöntem de denen yöntemlerin, çözüm üretmediği bilinmektedir. Örneğin  $f(x)=e^{-x}-x$  gibi basit görünen bir fonksiyon bile analitik olarak çözülemez. Bu tip durumlarda yaklaşım çözüm üreten nümerik yöntemlerdir. Fonksiyonu sıfır yapan değerleri bulmada en sık kullanılan yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Newton-Raphson Yöntemi
- Genetik Algoritmalar Yöntemi

Biz bu çalışmada, Genetik Algoritmalar ve Newton-Raphson yönteminden oluşan, hibrit genetik algoritma (HGA) yöntemini tercih ettik.

### 3.3. NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ

Newton-Raphson yöntemi, bağımsız değişkenin eksenle kesim noktasının yani kökün tahmini için fonksiyonun türevini kullanmaya dayanır. Bu tahmin birinci derece Taylor serisi açılımına dayandırılmıştır.

$$f(X_{i+1}) = f(X_i) + (X_{i+1} - X_i)f'(X_i) \quad (3.15)$$

Burada  $x_i$  kökün ilk tahmini,  $x_{i+1}$  ise eğimin  $x$  eksenini kestiği noktadır. Kesme noktasında  $f(x_{i+1})$  tanım gereği sıfırdır ve 3.15 eşitliği yeniden düzenlenerek denklem 3.16 elde edilir.

$$X_{i+1} = X_i - \frac{f(X_i)}{f'(X_i)} \quad (3.16)$$

Bu Newton-Raphson yönteminin tek denklem için yazılmış ifadesidir.

Birden fazla denklem için yazılmış ifadesi ise benzer şekilde çıkarılır. Ancak, kökün belirlenmesine birden fazla bağımsız değişken katkıda bulunduğu için Taylor serisinin çok değişkenli şekli kullanılmalıdır. İki değişkenli durumda her bir doğrusal olmayan denklem için birinci derece Taylor serisi yazılabilir.

$$u_i = u_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial u_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (3.17a)$$

$$v_i = v_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial v_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial v_i}{\partial y} \quad (3.17b)$$

Tek denklem versiyonunda olduğu gibi, kökün tahmini,  $u_{i+1}$  ve  $v_{i+1}$ ' in sıfır olduğu  $x$  ve  $y$  değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda 3.17 yeniden düzenlenerek denklem 3.18 elde edilir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} x_{i+1} + \frac{\partial u_i}{\partial y} y_{i+1} = -u_i + x_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + y_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (3.18a)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x} x_{i+1} + \frac{\partial v_i}{\partial y} y_{i+1} = -v_i + x_i \frac{\partial v_i}{\partial x} + y_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \quad (3.18b)$$

En son tahmin veya yaklaşıma karşılık gelen, bütün  $i$  indisli değerler bilindiğinden, bilinmeyenler yalnızca  $x_{i+1}$  ve  $y_{i+1}$ ' dir. Böylece 3.18 eşitliği, iki bilinmeyenli iki denklem sistemidir. Dolayısı ile cebirsel işlemler yapılarak çözülebilir.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{u_i \frac{\partial v_i}{\partial y} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y}}{\frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial v_i}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial y} \frac{\partial v_i}{\partial x}} \quad (3.19a)$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{v_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x}}{\frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial v_i}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial y} \frac{\partial v_i}{\partial x}} \quad (3.19b)$$

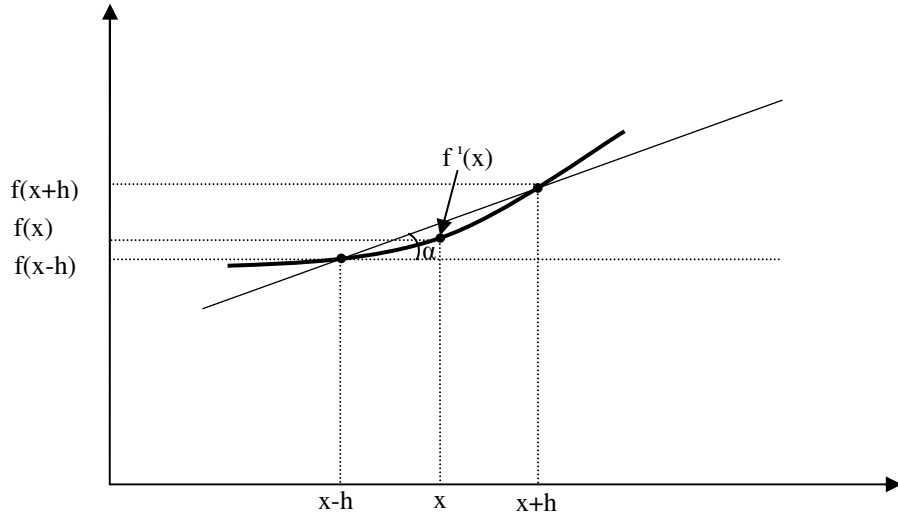
Her bir denklemin paydası sistemin Jakobiyen'inin determinanı diye bilinir. 3.19 eşitliği Newton-Raphson yönteminin iki değişkenli bir versiyonudur [28].

### 3.4. SAYISAL TÜREV ALMA

Bir fonksiyonun türevi, iki büyüklüğün oranına eşittir. Bu oranda pay; x değerindeki değişime karşılık f(x)' deki değişim miktarını, payda ise; x değerindeki değişim miktarını göstermektedir. f(x)'in türevi; eşitlik 3.20' de görüldüğü gibi f '(x) ile gösterilir.

$$f'(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (3.20)$$

f '(x) değeri, geometrik olarak f (x) fonksiyonuna x noktasında çizilen teğetin eğimi olarak ifade edilir. Şekil 3.4' de x=a noktasında, f(x=a) fonksiyonun türevi, f '(x=a) ile gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Türevin Geometrik Anlamı

Sayısal türev alma işlemi üç ayrı noktada yapılabilir. Bu şekilde türev hesaplama işlemi de;

- İleri fark yaklaşımı,
- Geri fark yaklaşımı
- Merkezi fark yaklaşımı olarak adlandırılan üç yöntemle yapılabilir [29].

İterasyon sayısına göre bir sonraki ve bir önceki değeri kullanmaya dayalı, Şekil 3.4' te gösterilen merkezi fark yaklaşımına ait sayısal türev eşitliği, eşitlik 3.21' de görülmektedir.

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (3.21)$$

### 3.5. GENETİK ALGORİTMALARLAR YÖNTEMİ

Bir fonksiyonun, birden çok sifıra yaklaşık değeri olabilir. Bu değerlere yerel minimum diyebiliriz. Bunun gibi fonksiyonları sıfır yapan değerini bulmada optimizasyon yöntemleri kullanılır. Sifıra yakın değerler içinde en yakın olanına global minimum diyebiliriz. Genetik optimizasyon global minimum değer bulmada çok iyi bir performans sergilemektedir.

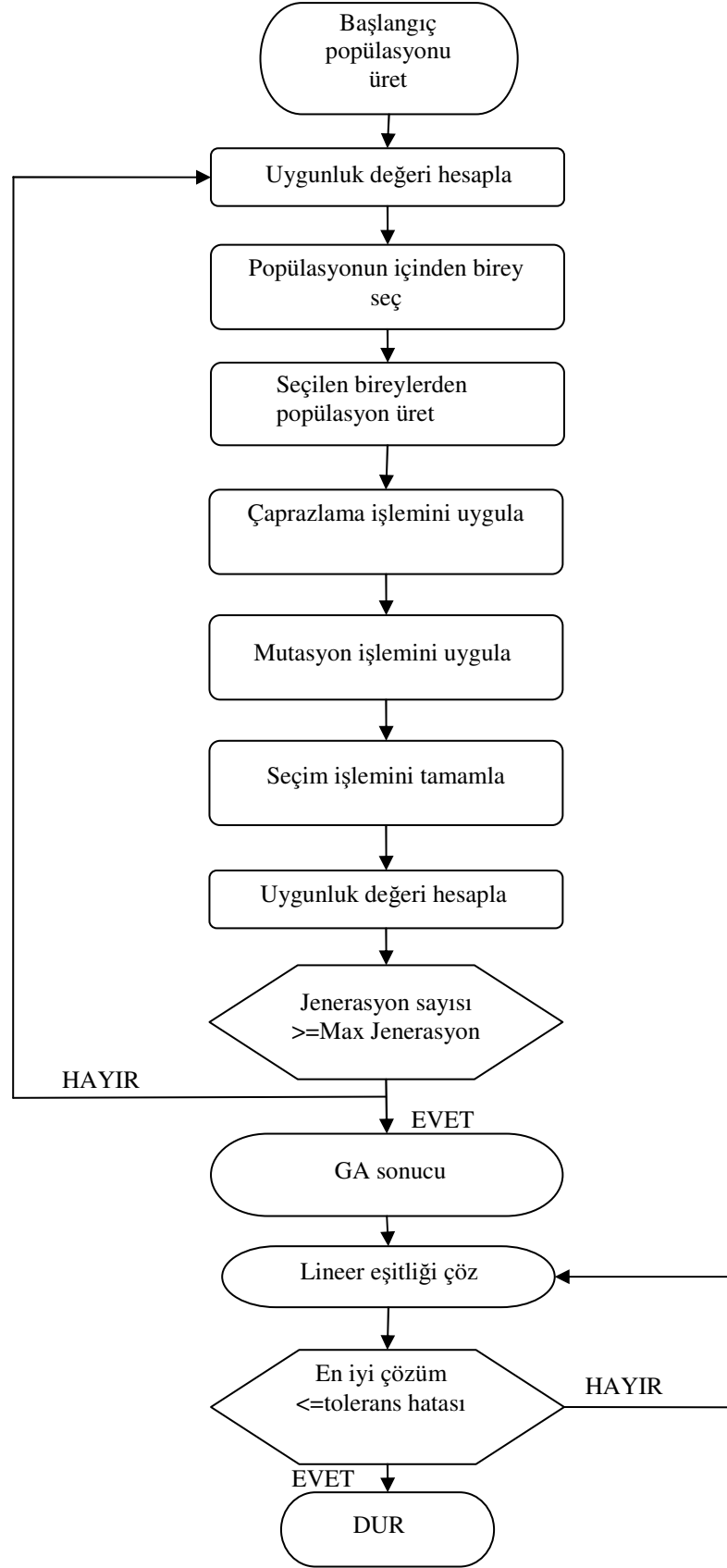
Geleneksel deterministik optimizasyon yöntemleri karmaşık problemlerin çözümünde bazen iyi sonuçlar üretmesine rağmen arama işlemi çözüm uzayının belli bir bölgesiyle kısıtlı kalır. Böyle bir durumda optimum çözümü verecek değerler bulmak için tüm arama uzayının en az yarısının aranması gerekebilir. Bu yöntemlerin dışında kullanılan diğer bir yöntem olan GA, yönlendirilmiş rastgele bir arama tekniği olup verilen bir problemin çözümünü rastgele oluşturulan başlangıç popülasyonunun yapay evrim sürecini oluşturarak yapmaya çalışır. Bu olası çözümler yapay doğal seçim ile her bir nesilde aşama aşama geliştirilir. Problemin çözümü esnasında, başlangıç popülasyonu sürekli evrim geçirerek, her bir zayıf birey elenir ve çözüm için en uygun bireyler varlığını devam ettirebilir. Hayatta kalan bu bireyler ortama daha uygun yeni bireylerdir ve elenen zayıf bireylerin ortama uymayan özelliklerini taşımazlar. Yani, her bir yeni birey aslında farkında olmadan çözüm için en uygun karakteristik özellikleri de üzerinde taşımaya ve sonraki nesillere aktarmaya baslar. Diğer bir deyişle, popülasyon kendi içinde bilinçsiz bir hafızaya sahiptir. Bu popülasyon birkaç nesil boyunca hayatta kalmış ve uyum sağlamış kromozomları ya da stringleri içerir. En son nesildeki en uygun birey çözüm için en olası iyi çözüm olarak alınır.

GA yönteminin en önemli avantajı, optimize edilecek problem hakkında 1. dereceden türev gibi ilave bilgiler gerektirmemesidir. Ancak, buna rağmen karmaşık çok boyutlu arama uzayında global bir optimum çözümü bulma sansı vardır. Ayrıca, verilen bir problemde problemin sınırlamalarından bağımsız olusu nedeniyle, optimizasyon için aranılan çözümü verebilecek en iyi yöntemdir. Bununla birlikte, GA yöntemi karmaşık arama uzayında önceki nesillerden kazanılan bilgiyi etkin bir şekilde kullanır. Oysa, klasik deterministik yöntemler optimizasyon problemlerinde sistemin karakteristik özelliklerine sahip olmak için yoğun gözlem ve hesaplamalara ihtiyaç duyarken GA basit operatörlerle ve hesaplamalarla sonuca ulaşabilmektedir. Doğal evrim sürecinde olduğu gibi, GA' ın yapay evrimi bazen çok uzun süre alabilir. Bu algoritmalar paralel işlemcili bilgisayarlara doğrudan uygulayarak zamandan kazanç sağlarlar.

### **3.5.1. Genetik Algoritmaların Çalışması**

Yukarıda da anlatıldığı gibi GA doğal evrimin bilgisayar ile taklit edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Holland karmaşık yapıların basit bir şekilde kullanılarak bit dizileri şeklinde

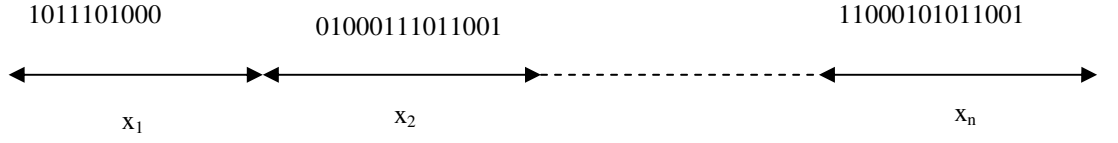
kodlanabileceğini göstermiştir (Mansfield, 1990). Bu durumda dizilerdeki bitler genlerin oynadığı rolü yerine getirecektir. Bahsi geçen karmaşık yapıdan anlatılmak istenen bir problemin çözümü için gerekli parametreler veya değişkenler kümesidir. Bu yapılar çözülecek probleme potansiyel çözümler sunar. Bu dizilerin ve bireylerin sayısı GA için popülasyonu oluşturur. Başarılı bireylerden oluşan nesiller geliştirmek için bir grup temel genetik operatör kullanılır. Bu genetik operatörler ile birlikte bizi çözüme ulaştıracak bir süreç başlatılır. Bu süreç düzenli bir şekilde kontrol edildiğinde, doğal evrimde olduğu gibi popülasyonun gelişimi hızlı bir iyileşmeye gidebilir. Popülasyonun içerdiği bireylerin çözüme uygunluğunun artması ortama daha iyi uyum sağlamış nesillerin üretilmesine neden olur. Diğer bir deyişle, bu güçlü bireyler probleme iyi çözümler sunar ve en iyi birey en uygun çözüm olabilir. GA büyük ve karmaşık bir arama uzayında bile yerel çözümlere takılmadan global bir optimuma ulaşılabilir. Şekil 3.5' te hibrit genetik algoritmanın akış şemasını görülmektedir.



Şekil 3.5 Hibrit Genetik Algoritma Akış Şeması

Uygunluk hesabı daha sonra yapılacak üretimlerde ortaya çıkan her yeni birey için ayrıca hesaplanır. Yukarıda bahsedilen GA' ın sahip olduğu 5 veya 6 temel aşamanın tümü GA' ın performansına önemli derecede etki eder. GA' da karmaşık yapıları göstermenin en iyi şekli 1 ve 0 ile ifade edilen ikili bit dizileri olup bu gösterim oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Bir popülasyondaki bireylerin her biri kodlanmış birer genetik sayı dizisi ile temsil edilir. GA' ın kodlaması 0 ve 1 değerleri alan basamakları ile, ikili sayı sistemine göre yapılıyor olmasının yanında, 0' dan 9' a kadar değer alabilen basamakları ile desimal sayı sistemi ile de yapılabilir. Ancak hesaplamalar bakımından kolaylığı dolayısı ile çoğunlukla ikili sayı sistemi kullanılır. Bu gösterime sahip GA ikili kodlanmış GA olarak bilinir. Bunun yanında başka koşullar altında çalışan daha etkin yöntemlerden biri de gri kodlama yöntemidir. Gri kodlama kullanımı ikili kodlamalarda sık sık karşılaşılan “Hamming cliff” problemini yok etmek için düşünülmüştür, zira ikili kodlamada komsu çözümlere sadece bir bit değiştirilerek ulaşılabilir. ikili kodlamada birkaç biti değiştirmek çözümü çabuklaştıracak gibi gözükse de yanıltıcı olabilir. İkili kodlamalar göreceli olarak kolaylıkla yakın bir optimal çözüme ulaşır. Şekil 3.5 başlangıç popülasyonunda kullanılan herhangi bir stringi veya kromozomu göstermektedir. Çözüme ulaşabilmek için önce karar değişkeni uzayında rastgele olarak, bir grup noktalar topluluğu alınır. Daha sonra takip edilecek kurallara göre bu noktalar arasında eşleştirmeler yapılarak popülasyonun bazı üyeleri yok olurken onların yerine yenileri üretilir.

Yeni gelenlerin popülasyona katılması ile öncekinden daha sağlıklı, yani hedefe daha yakın yeni bir popülasyon elde edilir. Böylece hedefe önceki bölümde açıklandığı üzere bir yön veya yol boyunca değil, birçok yönlerden ve kısa yollardan yaklaşılr, çünkü daha güçlü her yeni birey bir çözüm potansiyeline sahiptir. Eğer bir problemin çözülmesi sırasında gibi iki değişken varsa bunların iki tabanlı sayı sistemdeki kromozom yapısı aşağıdaki gibi olur. Şekil 3.6' daki gösterim ondalık değerleri olan  $n$  değişkenin bir kromozom olarak doğrudan ikili sayı sistemi ile gösterilmesinin sonucudur.



Şekil 3.6  $n$  Değişkene Sahip String veya Kromozomun Yapısı

Değişkenin büyüklüğüne göre bit sayıları değişebilir. Şekildeki kromozomda iki karar değişkenini temsil eden 0 ve 1'lerden oluşan sayı dizisinin her birine gen adı verilir. GA'da kromozomlardaki genler problemin değişkenleridir. Yukarıda verilen kromozom kendi başına bir anlam ifade etmez. Bunların desimal sisteme çevrilmesi gereklidir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi GA ile yapılan çoğu çalışmalar sırasında giriş ve çıkışlar desimal, optimizasyon sürecinin işleyişi ise ikili sayı sisteminde olur. Sunu belirtmek gerekir ki, Şekil 4.2'deki gibi bir ikili kodlama mecburi değildir. Çözüm uzayında yalnızca 10 adet değer alabilecek bir değişken de yine 10 bit ile gösterilebilir.

Örneğin  $x_1$ 'in çözüm kümesi  $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$  olsun.  $x_1$  değişkeni ikili sistemde yukarıdaki gibi 4 bit ile gösterilebileceği gibi örneğin;  $x_1=[0,0,0,0,0,0,0,0,1,0]=2$ ,  $x_1=[0,0,0,0,0,0,1,0,0,0]=8$  ve  $x_1=[1,0,0,0,0,0,1,0,0,0]=10$  olacak şekilde 10 bit ile de gösterilebilir. Bu tamamen programcının tercihidir. 4 bit ile ifade edilebilecek bir büyüklüğü 10 bit ile ifade etmek yanlış gibi gözükse de bazen doğru olabilir.

Sonuç olarak, GA işlemleri sırasında kodlanmış değişkenleri içeren bu tür kromozomlar kullanılır. Karar değişkenlerinin kromozomlar ile bu şekilde kodlanmasından sonra popülasyonda bulunan her kromozomun uygunluğunun hesaplanması gerekir. Popülasyondaki bireylerin uygunluklarının hesaplanmasına yarayacak bir amaç fonksiyonu bulunmalıdır. Eldeki sorunun türüne göre bir amaç fonksiyonu seçilir. Amaç fonksiyonu kriterine göre popülasyona dâhil olan kromozomlar ya hayatlarını devam ettirirler veya hayatları son bulur. Amaç fonksiyonunun en önemli özelliği, eşleşerek popülasyonda oluşan yeni bireylerden en uygunlarının hangileri olduğunu belirlemeye yardımcı olmasıdır. Her üreme aşamasından önce popülasyondaki kromozomların, hiçbir işlem yapmadan amaç fonksiyonu kullanılarak uygunluk değerleri hesaplanır. Bu değerler daha sonra daha uygun kromozomların üretilmesi için belirleyici bir faktör

olarak kullanılır. Uygunluk değeri yüksek olanların bir çok nesil boyunca popülasyonda kalması ihtimalleri yüksek, ama uygunluk derecesi düşük olanların o popülasyonda kalması ihtimali düşüktür. GA işlemleri devreye girerek ve kromozomların genlerinde işlemler yaparak, bazı bireylerin genlerinin kuvvetli olmasından dolayı, bu bireylerin sonraki popülasyonlarda da yer almasına karar verirler. Güçlü bireyler kullanılarak iki veya daha fazla genetik sayı çifti arasında yapılan bu işlemler bir sonraki popülasyonu daha güçlü yapar.

### 3.5.2. Amaç Fonksiyonu, Değişkenler ve Uygunluk Hesabı

Amaç fonksiyonu problemin değişkenlerini bünyesinde toplayarak bir çıkış bilgisi üretir. Bu fonksiyon matematiksel bir ifade olmasının yanında, yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar olabilir. Burada amaç, değişkenleri optimizasyon noktasını bulabilecek şekilde değiştirmektir. GA'ın ilk aşaması değişken dizisini temsil eden kromozomların elde edilmesi ile başlar. Eğer bir problemin  $x_1, x_2, \dots, x_n$  olmak üzere  $n$  tane değişkeni varsa bir  $X$  kromozomu her bir değişken 0 ve 1 rakamlarından meydana gelen bir dizi şeklinde yazılır.

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n] \quad (3.22)$$

GA'ın iyi işlemesi için değişken sayısının çok fazla olması istenmez. Bazen en gerekli ve göz önünde tutulması gereken değişkenler, uzman görüş veya birkaç deneme ve yanılma hesabı ile bulunabilir. Optimizasyon sorunlarının hemen hepsinde değişkenlerin alt ve üst sınırları bulunur. İncelenen olayın boyutlarına iyi karar verilmelidir. Eğer değişken olarak bir otomobilin ağırlığından bahsediliyor ise, bu değer 1 ile 2 ton arasında olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Araştırmacının, optimize edeceği problemde bulunan değişken ve değerlerin hemen hepsi hakkında gerçekçi öngörülere sahip olmasında, çok yarar vardır. Optimizasyon problemlerinde bazı değişkenler birbirine bağımlı olabilir. Mesela, bir insanın boyu ile ağırlığı genel olarak birbiri ile bağımlıdır. Benzer şekilde bir elektrik devresinde bir koldan geçen akım, aynı kolun üzerindeki dirence bağlıdır. Görüldüğü gibi değişkenler birbirine bağımlıdır ve değişkenler arasındaki bu ilişki basit bir şekilde ifade edilebiliyor ise bu tip problemlerin çözümünde GA'dan ziyade klasik Optimizasyon yöntemlerinin

kullanılması daha doğru olur. GA daha çok orta ve zayıf bağımlı değişkenleri olan Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılır. Burada esas olan problemin türüne göre hareket etmektir. Bir Optimizasyon probleminde en zor olan asama amaç fonksiyonunun belirlenmesidir.

### 3.5.3. GA' da Değişkenler

İkili sayı sisteminde GA oldukça geniş fakat sonlu olan çözüm uzayında çalışırlar. Bu nedenle GA değişkenlerinin ayrıklaştırılması, değişkenlerin sonlu sayıda değer alması durumunda çok yararlı olur. Eğer bir değişken sürekli ise onun GA uygulamalarından önce mutlaka ayırık hale getirilmesi gereklidir. Bunun için uygulanacak yöntemlerden birisi sudur. Değişkenin aralığı sonlu sayıda alt aralıklara bölünür. Bu aralıkların herhangi birine düşen değer bu aralığın orta noktası olarak kabul edilir. Bu türlü çalışma optimizasyon yöntemlerinde en uygun olanıdır. Çünkü ortaya çıkabilecek hata miktarları da en büyük olur. İşte bu en büyük hataların minimize edilmesi, küçük olan hataların daha da azalmasına yol açar. Herhangi bir değişkeninin ikili sayı sistemindeki kodlaması  $(a, b)$  aralığında reel sayıya dönüştürmek için 3.23 denklemini kullanılır.

$$X_{ab} = a + \frac{(X - a)}{(b - a)} \quad (3.23)$$

Verilen değişken değeri böylece  $a$  ile  $b$  arasına düşecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Bu yapılması zorunlu bir işlem olmamakla birlikte programlama aşamasında kolaylık ve anlaşılabilirlik sağlayacaktır.

### 3.5.4. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Çoğunlukla ikili sayı olarak üretilen rastgele başlangıç popülasyonu  $N \times l$  boyutlu bir matris ile ifade edilir. Kromozomlar bir veya daha fazla sayıda değişkenden oluşabilir. İlk başta hemen sorulması gereken soru, acaba başlangıç popülasyonunda kaç tane kromozomun (çözüm alternatifi) olması gerektiğidir. Buna cevap ancak yapılan çalışmaların sonucundaki gözlemlerle verilebilir, ama başlangıçta en az 30 adet kromozom gerekir. Ancak popülasyondaki kromozom sayısını doğrudan belirleyen bir

formül olmamakla beraber genelde 50-100 arasındaki değerler tercih edilir. Popülasyondaki birey sayısı daha çok ele alman problemin türüne bağlı olarak belirlenir. GA' ın bu tip problemlerinde en iyi sonucu elde etmek ancak deneyimle mümkündür. Değişik optimizasyon örnekleri ile sürekli çalışan bir tasarımcı, başlangıç popülasyonundaki birey sayısı ile ilgili daha iyi tahminlerde bulunabilir.

### **3.5.5. Seçim İşlemi**

Bu süreç mevcut popülasyon içinden belli bir seçim kriteri ile uygunluk değerlerine göre kromozomların seçilmesidir. Bu tip seçme işlemi çeşitli seçim stratejileri ile yapılabilir. Popülasyon karar noktaları arasında daha da iyileşme şeklinde evrim gösterecek bir sonraki popülasyonu oluşturacak çözüm noktaları (kromozomlar) olasılıksal geçiş kuralları kullanarak seçilebilir. Böyle bir seçim popülasyonun daha da iyiye doğru gelişmesini temin eder. Buradaki temel yaklaşım, uygunluk değerleri küçük olan kromozomların elenip büyük olanların hayatta kaldığı yeni bir popülasyonu ortaya çıkarmaktır. Bir popülasyonda kromozomların seçilme işlemi, uygunluk değerleri uygunluk değerlerine göre saptanır. Kromozomların nasıl seçileceği ile ilgili olarak geliştirilen bazı yöntemler aşağıdadır.

#### **3.5.5.1. Rulet Çemberi Yöntemi**

Bu yöntemde seçilecek bütün kromozomların amaç fonksiyonu ile uygunluk değerleri hesaplanır ve uygunluk değeri en yüksek olan seçilme olasılığı da en yüksek olan olur. Uygunluk değeri en küçük olanda seçilme olasılığı en küçük olandır.

#### **3.5.5.2. Sıralama Yöntemi**

Bu yöntemde de seçilecek bütün kromozomların amaç fonksiyonu ile uygunluk değerleri hesaplandıktan tüm değişkenler uygunluk değerlerine göre sıralanır. Eğer  $N$  tane kromozom var ise uygunluk değeri en büyük olana  $N$ , en küçük olana da  $1$  değeri verilerek kromozomlar sıralanır. İşte bu değerlerin büyüklüğü her bir kromozomun seçilme olasılığını belirler.

### 3.5.5.3. Turnuva Yöntemi

Bu yöntemde  $N$  adet kromozomun olduğunu düşünelim. 2 ile  $N$  arasında bir sayı belirlenir. Bu sayı  $r$  olsun. Popülasyondan  $k$  adet kromozom rastgele seçilecekse, seçilen  $r$  adet kromozomdan, uygunluk değeri en iyi olan eşleşme havuzuna alınır. Diğerleri geri döner. Sonra kalanlardan  $r$  adet daha rastgele seçilir ve bu kalanlardan en iyisi yeniden eşleşme havuzuna alınır. Bu şekilde  $k$  adet kromozom seçilene kadar işlem devam eder ve eşleşme havuzuna alınanlar eşleştirilir. Yukarıdaki üç yönteme ek olarak başka yöntemlerde vardır. Yalnız bu yöntemlerden en verimlisinin hangisi olduğu probleme göre değişebilir. Ayrıca araştırmacı bu yöntemlerin dışında yeni yöntemlerde kullanabilir.

### 3.5.6. Çaprazlama İşlemi

Çiftlerin bir araya gelerek birleşmesi ile yeni kromozomları ortaya çıkması esasen kromozomların çaprazlanması ile olur. Burada oluşan bireyler artık yeni olup arama uzayının araştırılmaya başlandığını gösterir. Çaprazlama ile birlikte en iyi değere doğru popülasyon yavaş yavaş yaklaşılmaya başlar. Çözüm araması sırasında çözüme aday olan iki farklı karar uzayı noktası arasında yapılan bir çaprazlama ile öncekilerden daha iyi yani en iyi çözüme daha yakın olabilecek iki tane yeni çözüm noktası ortaya çıkarılır. Bu iki yeni çözüm noktası önceki noktalardan kalıtsal olarak doğar. Böylece çözüm popülasyonundaki karar noktaları daha iyiye doğru evrimleşecek biçimde yeni bir popülasyon meydana getirir. Burada iki çözüm noktasının sayısal değerlerinin bazı haneleri aralarında çaprazlama yaparak yeni çözüm noktalarının ortaya çıkması sağlanır. Çaprazlamaya tabii tutulacak esler rastgele veya çeşitli yöntemlerle seçildikten sonra kromozom eslerinin hangi genlerden itibaren kesileceği yine rastgele belirlenir. Kesilen genler, kromozom esleri arasında karşılıklı değiştirilir. Burada amaç eldeki kromozomlardan yeni kromozomlar elde etmektir. Bu işlemde çaprazlanacak kromozom eşleri ve bunların hangi genlerden itibaren çaprazlanacağı rastgele olarak belirlenir. Çeşitli çaprazlama teknikleri aşağıda sunulmuştur.

### **3.5.6.1. Tek Kesimli Çaprazlama**

Burada eslesen iki kromozom, iki yeni kromozom oluşturarak kromozom sayısının aynı kalmasını sağlar. Öncelikle iki kromozomun ilk ve son rakamları arasında bir yerde rastgele olarak çapraz geçiş noktası tespit edilir. Bir kromozomun çapraz geçiş noktasının solunda bulunan hanelerdeki tüm rakamlar olduğu gibi diğer kromozom ile yer değiştirir.

### **3.5.6.2. Çift Kesimli Çaprazlama**

Yukarıda açıklanan tek kesimli çaprazlama kesimin kromozom boyunca iki yerde yapılması ile aynen tekrarlanır. Burada kromozom esleri iki farklı yerden kesilerek çaprazlama uygulanır ve kromozomun sadece orta kısmı değiştirilir. İstenirse yalnız yan taraflar veya orta kısım ile beraber yalnız sağ yalnız sol kısımda çaprazlanabilir. Böylece farklı kromozomlar elde edilebilir.

### **3.5.6.3. Çok Kesimli Çaprazlama**

Kromozomların çapraz olarak ikiden daha fazla yerden rastgele kesilerek genlerin değiştirilmesi ile sağlanır. Aynı şekilde burada da karşılıklı parçalar değişik şekillerde çaprazlanarak yeni kromozomlar elde edilir.

### **3.5.6.4. Üniform Çaprazlama**

Bu işlemde rastgele haneler karşılıklı olarak yer değiştirir. Her bir hane için değişip değiştirilmemesine rastgele karar verilip, kromozomun o hanesine duruma göre davranılır.

### **3.5.6.5. Tersleme**

Kromozomun soldan sağa olacak yerde sağdan sola doğru gen dizisi ile okunması durumunda ortaya çıkan kromozomdur.

Böylece kromozomun ilk halinden tamamen farklı yeni bir kromozom elde edilir.

### **3.5.6.6. Karıştırmalı Çaprazlama**

Tek noktalı çaprazlamada kromozomların ilk kısımları aralarında aynı sıra dâhilinde rakamlarla değiştirilecek yerde rakamlar tamamen bağımsız ve üniform bir rastgele sayı üreticisi ile yeni bastan 0 veya 1 rakamları ile doldurulur ama esas kromozomların ikinci kısımları aynen kalırsa buna karıştırmalı çaprazlama denir.

### **3.5.6.7. Ara Birleşmeli Çaprazlama**

Eğer bir kromozoma yakın başka kromozomlar üretilmek isteniyorsa bu takdirde iki kromozomdan uygun kısımların alınarak aşağıdaki denkleme göre bir araya getirilmesi ile yeni ve istenen türde kromozomlar üretilebilir. İki ana kromozomun değerleri  $K_1$  ve  $K_2$  ise bunların karıştırılması sonucunda yeni üye  $K_y = a(K_2 - K_1)$  şeklinde elde edilir. Yapılan çalışmalara göre  $-0.25 < a < 1.25$  arasında rastgele bir sayı olarak seçilmelidir.

### **3.5.6.8. Doğrusal Birleşmeli Çaprazlama**

Önceki çaprazlama biçimine benzerlikle birlikte birleşme durumları, sabit  $a$  değerinin kromozomlar arasındaki fark ile çarpımına  $K_1$  kromozomunun ilave edilmesi ile bulunur. Böylece ilk kromozomları karar uzayında birleştiren doğrunun üzerinde yeni kromozomlar elde edilir.  $K_y = K_1 + a(K_2 - K_1)$ .

### **3.5.7. Mutasyon İşlemi**

Kromozom bitlerinin rastgele değiştirilmesini esas alan GA işlemidir. Bu işlem sayesinde en iyi çözümün aranması sırasında GA'ın bir adım sonraki çözümü arama alanının uzağında çok daha iyi veya kötü bir çözümü dener. GA'ın kötüye doğru giderken bile bir sonraki adımda yapılacak bir bit değişimi ile algoritma kendisini toparlayarak en iyiye doğru gitmeye baslar. Böyle bir fırsat klasik yöntemlerde yoktur, çünkü hepsi önceden belirli bir sistem dâhilinde karar uzayında bir sonraki adımı atar.

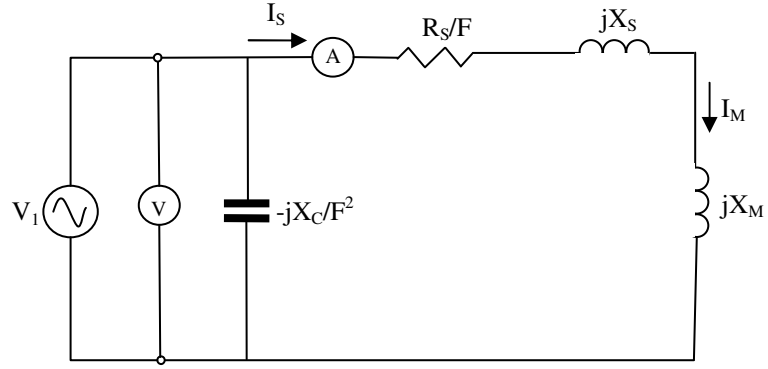
Bu tür atılımlar her zaman başarılı olmasa da algoritma kendisini rastgele yenilediği için fazla zaman kaybı olmayabilir. Bit değişikliği kromozomun bir hanesindeki 0 değerini 1 veya 1 değerini 0 yapma işlemidir. Bu işlem kromozomun bir hanesinde yapılabileceği gibi birden fazla hanede de yapılabilir. Böylece bir rakamın bile değişmesi ile ortaya çok farklı bir sayı çıkar.

Bu süreç aynı kromozomun bir veya birkaç hanesindeki rakamın tümleyeni ile değiştirilmesi işlemidir. Rakam değişimleri ile GA ikinci türden amaç fonksiyonu yüzeyini araştırır. Böylece başlangıçta bulunmayan kromozom türleri elde edilerek, optimizasyon işleminde GA'ın çözüme hızlı bir şekilde yaklaşması önlenmiş olur. Eğer bir kromozoma birli rakam değişimi uygulanıyorsa, bu takdirde 1 sayısı 0 sayısına veya aksine dönüştürülür. Genelde her iterasyonda hanelerin % 0.5' i ile % 0.1' i miktarında rakam değişimi yapılır. En son iterasyonda artık rakam değişimi yapılmaz. Genel olarak, en iyi çözümlenelerde de rakam değişikliğine müsaade edilmez. En iyi kromozomların dışındakiler arasında yukarıda belirtilen oranlarda rakamların değiştirilmesi yapılır.

Mutasyon işleminden sonra her defasında fonksiyonun uygunluk değeri hesaplanır. Algoritma bu şekilde sonuca ulaşınca kadar döndürülür ve işlem durur. Böylece bir fonksiyonu sıfır yapan değerler hesaplanmış olur [30].

### **3.6. KULLANILAN ASENKRON GENERATÖR**

Asenkron generatörlerde; değişen  $X_M$  ve  $F$  değerine karşılık generatörün hava aralığındaki  $V_G$  gerilimi de değişir. Bu ilişkiye  $V_G/F$ ' nin  $X_M$  ile değişimi diyebiliriz. Bu ilişki genellikle doğrusal azalma tekniği ile Şekil 3.7' de gösterilen deneysel düzenden elde edilen verilere uygun olarak elde edilir.

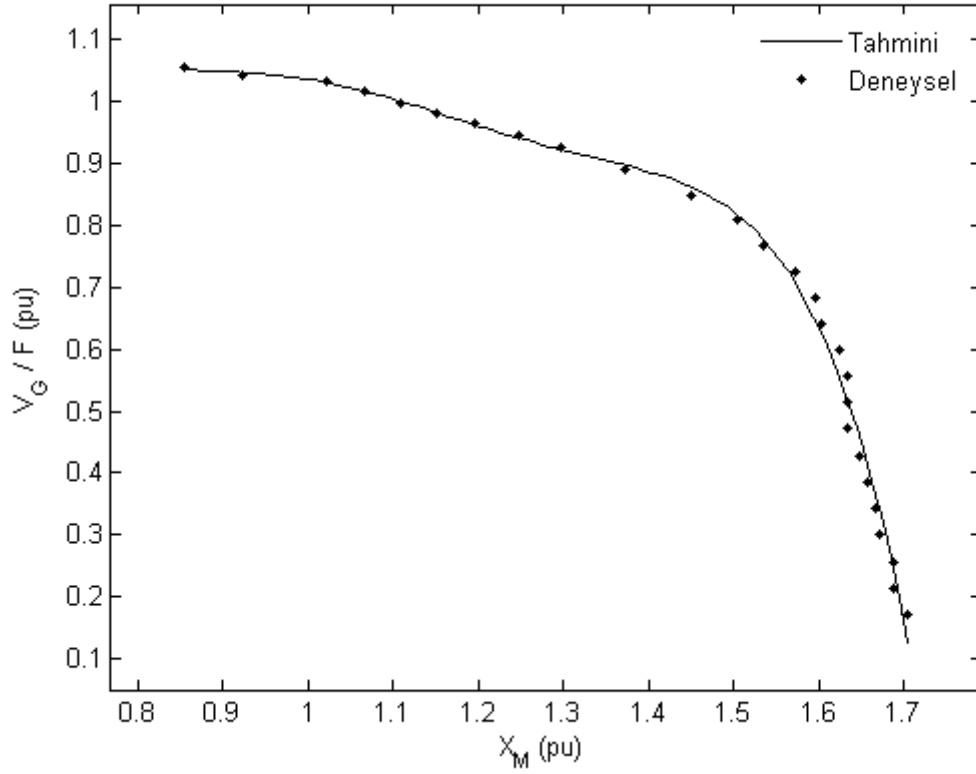


Şekil 3.7  $X_M$ ' nin Hesaplanmasında Kullanılan Tipik Bir Devre

Bu işlem sırasında, DC motor ile senkron hızda döndürülen rotor çubuklarından akım akmaz ve böylece eşdeğer devre ölçüm için basitleşmiş olur. Sonra stator sargılarına senkron frekansta ayarlı bir AC güç kaynağı ile  $V_1$  gerilimi uygulanır. Her kademedeki  $V_1$  gerilimine karşılık ölçülen stator akımı ( $I_s$ ) ile toplam empedans ( $Z_T$ ) hesaplanır. Manyetize edici reaktans ( $X_M$ ), eşitlik 3.25' de verilen ikinci dereceden polinom ile çözülür [31].

$$X_M^2 + 2X_S X_M + R_S^2 + X_S^2 - Z_T^2 = 0 \quad (3.24)$$

Bu NR ile çözülebilen bir kök bulma problemidir.  $X_M$  ile  $V_G/F$  nin değişimi tıpkı mıknatıslanma eğrisi gibi doğrusal olmayan bir grafikte ve Şekil 3.8' de görülmektedir.



Şekil 3.8 X<sub>M</sub> ile V<sub>G</sub>/F'nin Değişim Grafiği

### 3.7. HGA' IN UYGULANILMASI

HGA ilk olarak Şekil 3.4' de görüldüğü gibi başlangıç popülasyonu üretmekle işe başlar. Popülasyon 10 bitlik 100 bireyden oluşmaktadır ve F ve X<sub>M</sub> için aynı anda oluşturulmaktadır. Binary olarak kodlanmış bireyler eşitlik 3.25' de görülen amaç fonksiyonunu ve eşitlik 3.26' da görülen uygunluk fonksiyonu hesaplanırken gerçek sayılara dönüştürülmüştür.

$$\Omega = \sum_{i=1}^2 |f_i(F, X_M)| + \varepsilon \quad (3.25)$$

$$\Phi = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 |f_i(F, X_M)| + \varepsilon} \quad (3.26)$$

Eşitlik 3.25 ve 3.26' da  $\varepsilon$  ile gösterilen hata miktarı işlemi sıfırlama kriteri olarak kullanılmıştır. Geçici popülasyonun içinden bireylerin seçiminde rulet çemberi seçim

yöntemi kullanıldı. Seçilen popülasyonlara uniform çaprazlama işlemi uygulandı ve çaprazlama olasılığı 0,8' dir. Eğer çaprazlama işleminden sonra seçkin bireyleri kaybetmemeden 0,05 olasılıklı mutasyon işlemi yapılmıştır. Ek olarak her jenerasyondaki mutasyon yapılan bireylere en iyi bireyleri kaybetmemek ve gelecek jenerasyonlara taşımak için elitizm işlemi uygulandı. Bu başkalaşma riskine rağmen HGA' nın performansının artmasına yardım etmiştir. Önerilen HGA yazılımı, bilgisayar ortamında kurulu MATLAB yazılımında kodlandı.

## 4. BULGULAR

Bu bölümde kapasitör uyartımlı asenkron generatörün bir faz eşdeğerinden elde edilen çok değişkenli denklem sisteminin MATLAB yazılımında, hibrit genetik algoritmalar yöntemi ile çözümünden elde edilen grafiklere yer verilmiştir.

Hesaplamalarda akım, gerilim, reaktans gibi büyüklükler per-unit birim sistemine göre kullanılarak, sayısal hesaplamada sadelik sağlanmış ve bu büyüklüklere bağlı değerler yüzde olarak belirtilmek sureti ile gerçeğe uygunluğu ve doğruluğu, kolay anlaşılır hale getirilmiştir.

Asenkron generatörün devir sayısı senkron devir sayısında sabit tutulmuş, dolayısı ile buna bağlı olarak  $v=1$  pu kabul edilerek matematik modelde bilinmeyen sayısı  $X_M$  ve  $F$  olarak ikiye indirgenerek hesaplamalar yapılmış, her kademedeki hesaplanan  $X_M'$  ye karşılık gelen  $V_G$  değeri mıknatıslanma deneyinden faydalanılarak belirlenip, değişik kapasitans değerlerinde terminal gerilimi, yük akımı, çıkış gücü, giriş gücü, verim ve frekans hesaplanmıştır. Bu çalışmalar değişik yük ve koşullarda tekrarlanarak sonuçlanarak sonuçları grafikler halinde elde edilmiştir. Şimdi bunları inceleyelim.

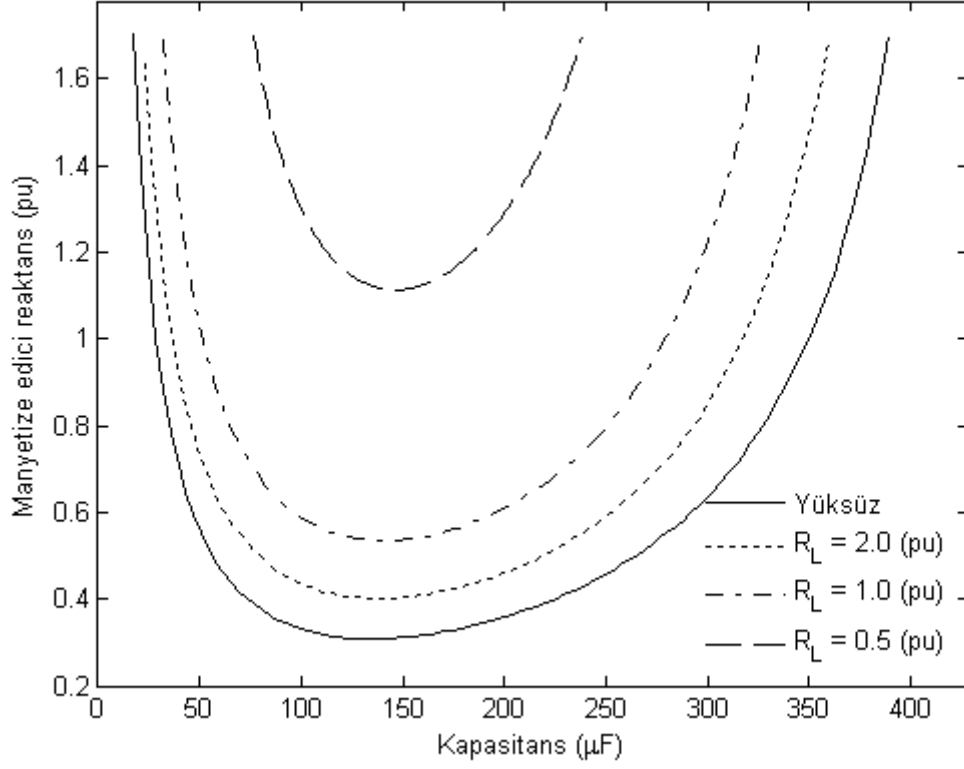
### 4.1. REZİSTİF YÜKLÜ DURUM

Generatör uçlarına saf rezistans bağlı iken asenkron generatörün parametreleri incelenmiştir. Üç ayrı yük için hesaplamalar ayrı ayrı tekrarlanarak sonuçları aynı grafikte gösterilmiş böylece değişen yük koşullarında sonuçların değerlendirilmesi olanağı sağlanmıştır.

Şekil 4.1' de kapasitanstaki değişmeye karşılık manyetize edici reaktansındaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v=1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu,  $R_L=1,0$  pu ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durumlarda ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Bu çalışmada kapasitör değeri 0-400  $\mu F$  aralığında değiştirilerek manyetize edici reaktansındaki değişim gözlenmiştir.  $X_M$  maksimum değerlerden başlayıp azalarak minimum değere ulaşmakta daha sonra yeniden artarak maksimum değere çıkmaktadır. Bu değişim motor yüklendikçe daha dar bir alanda gerçekleşmiştir.

$X_M$ ' yi minimum yapan özel bir kapasite değeri vardır. Bu değer bütün yüklerde aynı olduğu görülmektedir. Fakat generatör yüklendikçe  $X_M$ ' nin ulaştığı minimum değer yükselmektedir.

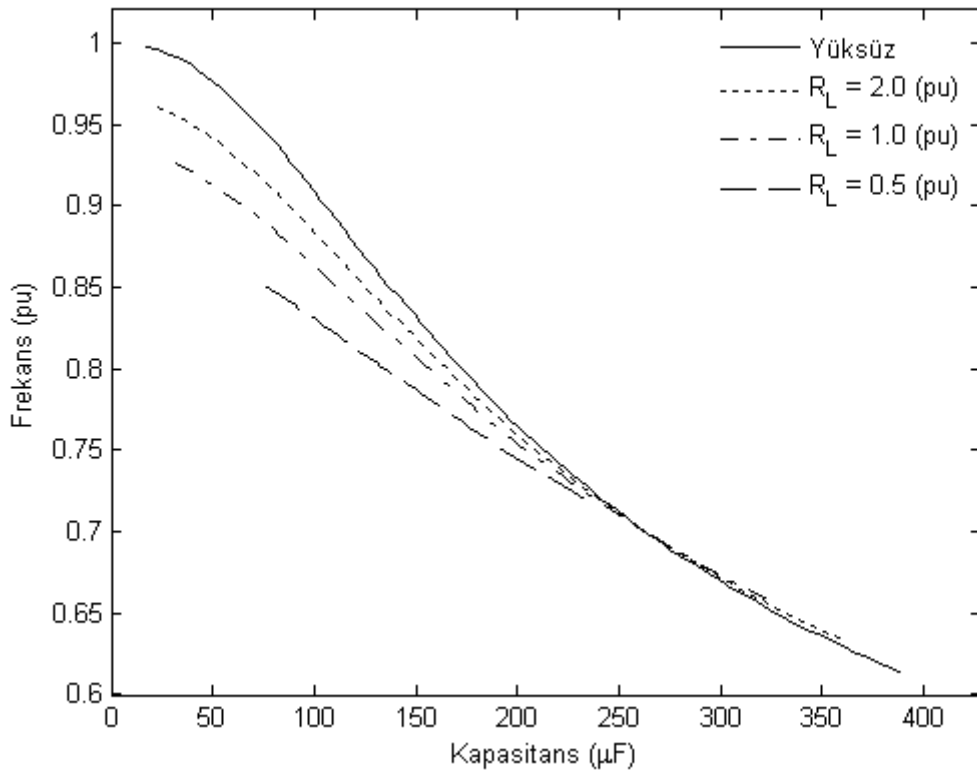


Şekil 4.1 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $X_M$ ' nin Değişimi

Şekil 4.2’ de kapasitanstaki değişmeye karşılık generatör frekansındaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v=1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Bu çalışmada kapasitör değeri  $0-400 \mu F$  aralığında değiştirilerek generatör frekansındaki değişim gözlenmiştir. Görülüyor ki generatör yüksüz durumda kapasitörün minimum değerlerinde  $F=1$  pu değerinde iken kapasitör değeri arttıkça frekans azalarak  $F=0,62$  pu seviyelerine kadar düşmüştür. Aynı işlemler Değişik omik yüklerde tekrarlandığında yüklendikçe frekansın düştüğü ve kapasitör değeri artırıldığında frekansın yaklaşık olarak  $F=0,62$  pu değerine kadar düştüğü şekilden açıkça görülmektedir.

Bu çalışmadan generatör frekansının kapasitör değerine ve yüke bağlı olarak belli oranda değiştiği, bu değişimin yük arttıkça ve kapasitans arttıkça azalan yönde olduğu görülmektedir.

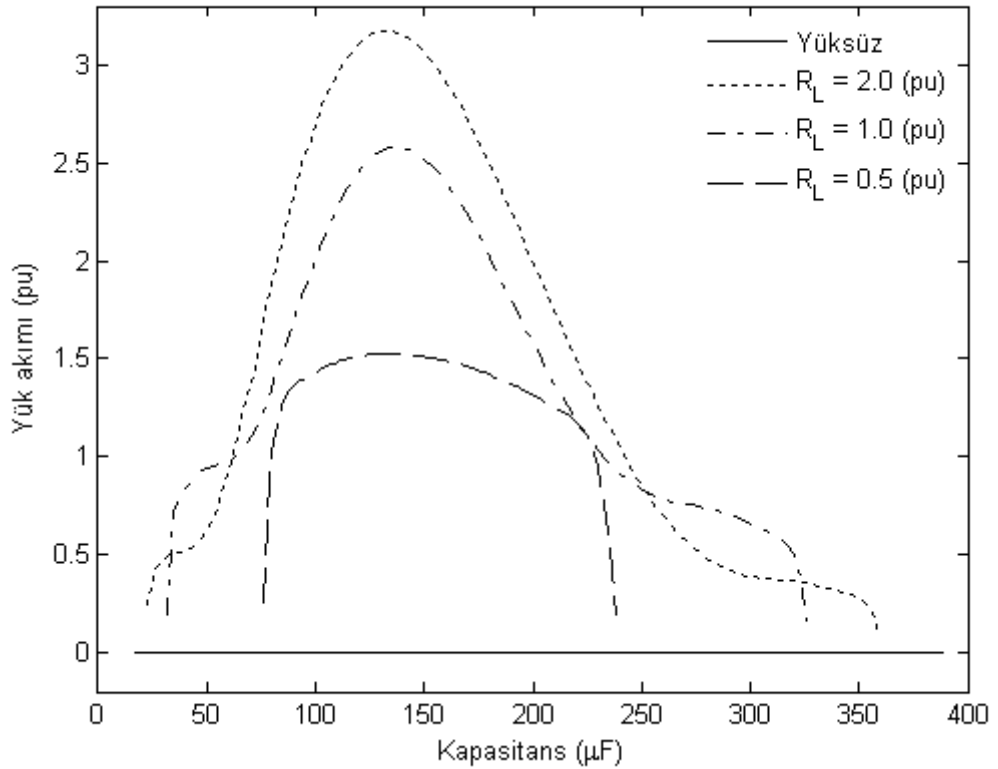


Şekil 4.2 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $f'$  nin Değişimi

Şekil 4.3' de kapasitanstaki değişmeye karşılık generatör frekansındaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Generatör yüksüz iken yük akımı 0 değerinde sabittir.  $R_L=2,0$  pu yükünde yük akımının maksimum değerinde ulaştığı ve değer kapasitörün belli değerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $R_L=1,0$  pu yükünde yük akımının benzer bir değişim gösterdiği fakat daha düşük değerlere ulaşabildiği, yine bu akımın belli kapasite değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $R_L=0,5$  pu yükünde yük akımının daha düşük değerlere ulaşabildiği görülmektedir.

Maksimum yük akımı elde etmek için kullanılacak kapasitörün, bir minimum ve maksimum değerinin olduğu yapılan çalışmadan açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.3' te bunu doğrulamaktadır.

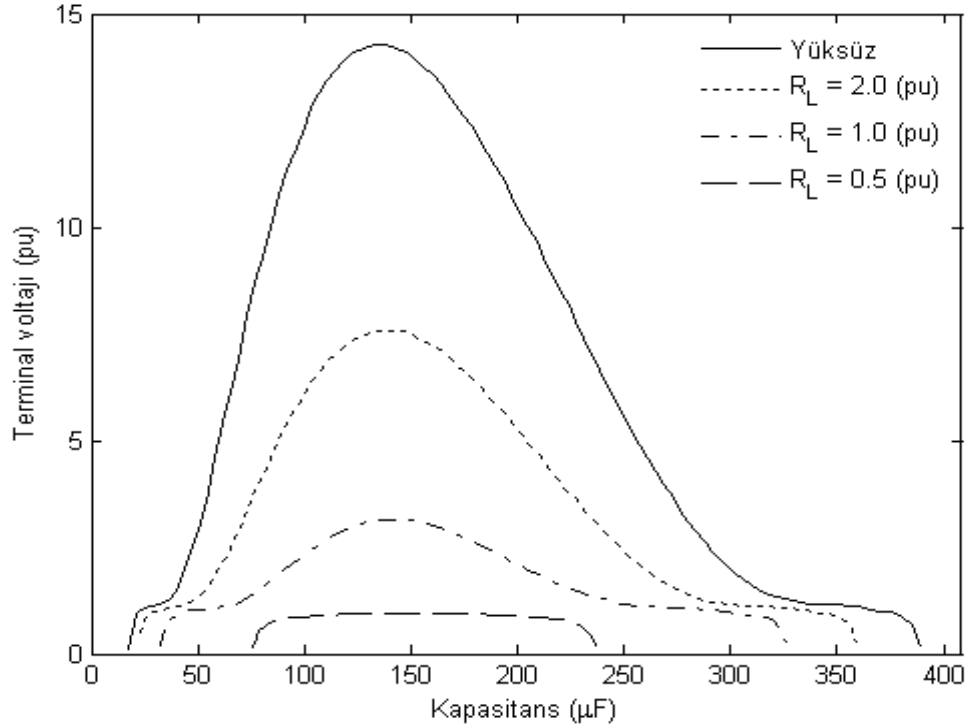


Şekil 4.3 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

Şekil 4.4’ de kapasitansdaki değişmeye karşılık generatör terminal voltajındaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $\omega = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-400  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile terminal voltajı kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $R_L=2,0$  pu yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $R_L=1,0$  pu ve  $R_L=0,5$  pu yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum değer azalmaktadır.

Bu çalışmadan terminal gerilimi elde etmek için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin hep aynı değerde gerçekleştiği ve yük arttıkça gerilimin azaldığı açıkça görülmektedir.

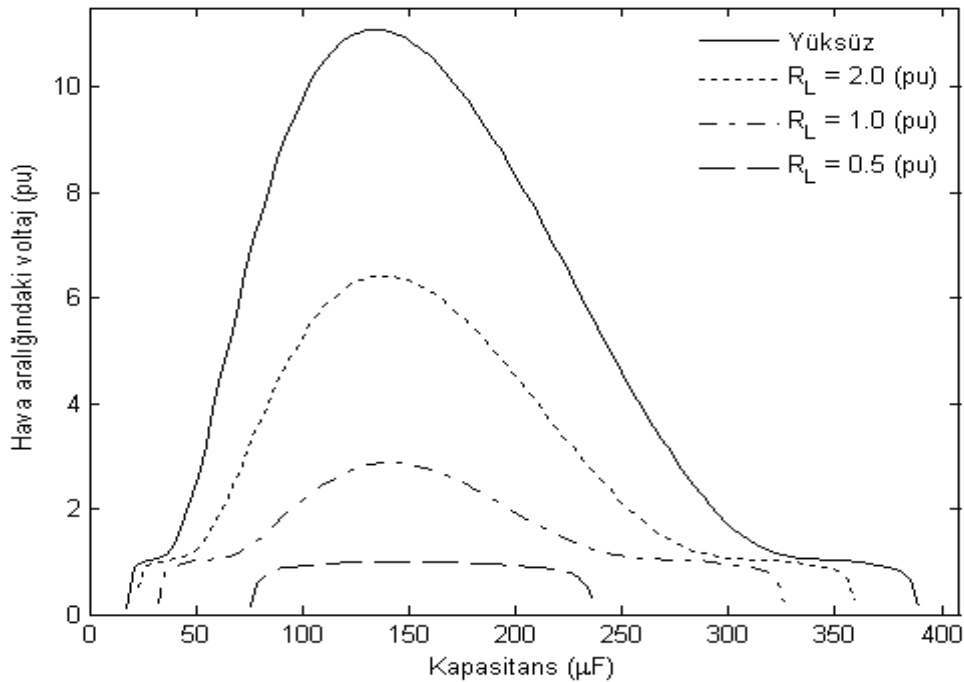


Şekil 4.4 Üç Ayrı Omik Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $V_T$ ’ nin Değişimi

Şekil 4.5’ de kapasitansdaki değişmeye karşılık generatörün hava aralığındaki voltajdaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-400  $\mu F$  aralığındaki değişimi ile hava aralığındaki voltaj kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla yükselerek maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $R_L=2,0$  pu yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $R_L=1,0$  pu ve  $R_L=0,5$  pu yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat hava aralığı voltajının ulaştığı maksimum değer azalmaktadır.

Bu çalışmadan hava aralığındaki gerilimi elde etmek için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin hep aynı değerde gerçekleştiği, yük arttıkça gerilimin azaldığı ve terminal voltajı ile benzerlik gösterdiği açıkça görülmektedir.

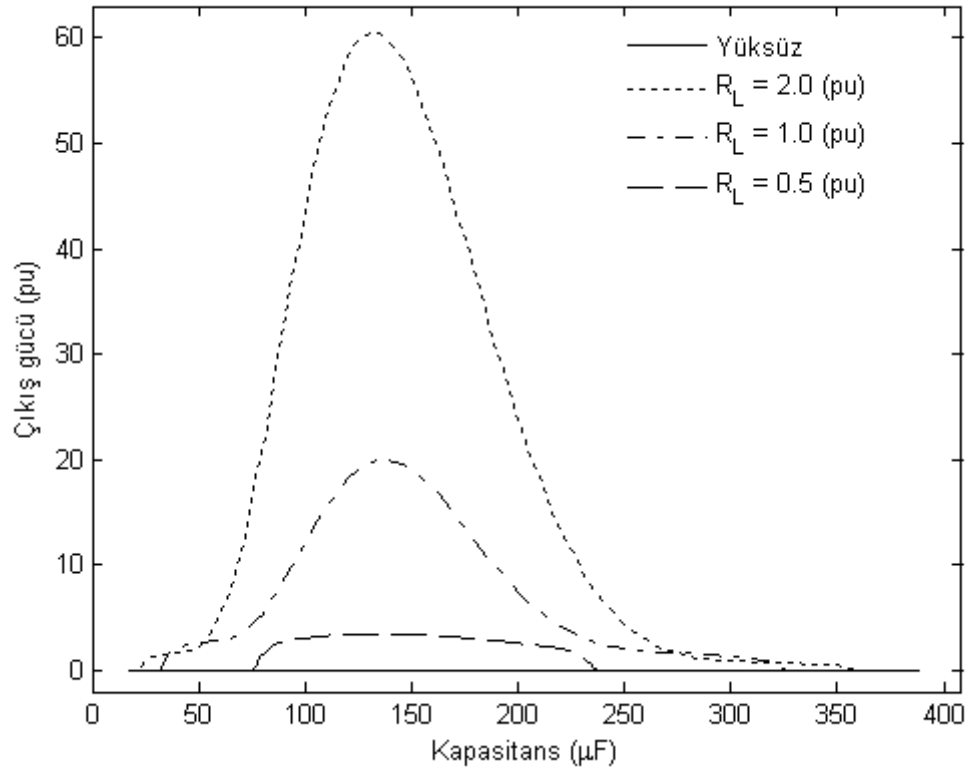


Şekil 4.5 Üç ayrı omik yükte kapasitansdaki değişmeye karşılık  $V_G$ ' nin değişimi

Şekil 4.6’ da kapasitanstaki değişmeye karşılık generatör çıkış gücündeki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Generatör yüksüz iken çıkış gücünden bahsedilemeyeceğinden, grafikten de düz çizgi ile 0 değerinde sabit olduğu görülmektedir.  $R_L=2,0$  pu yükünde kapasitanstaki değişim karşısında çıkış gücündeki değişim terminal voltajındakine benzer değişim göstermiş ve bir yerde maksimum değerine ulaşmıştır.  $R_L=1,0$  pu yükünde benzer değişim sergilediği fakat daha düşük bir maksimum değere ulaştığı görülmektedir.  $R_L=0,5$  pu yükünde çıkış gücünün çok düşük olduğu açıkça görülmektedir.

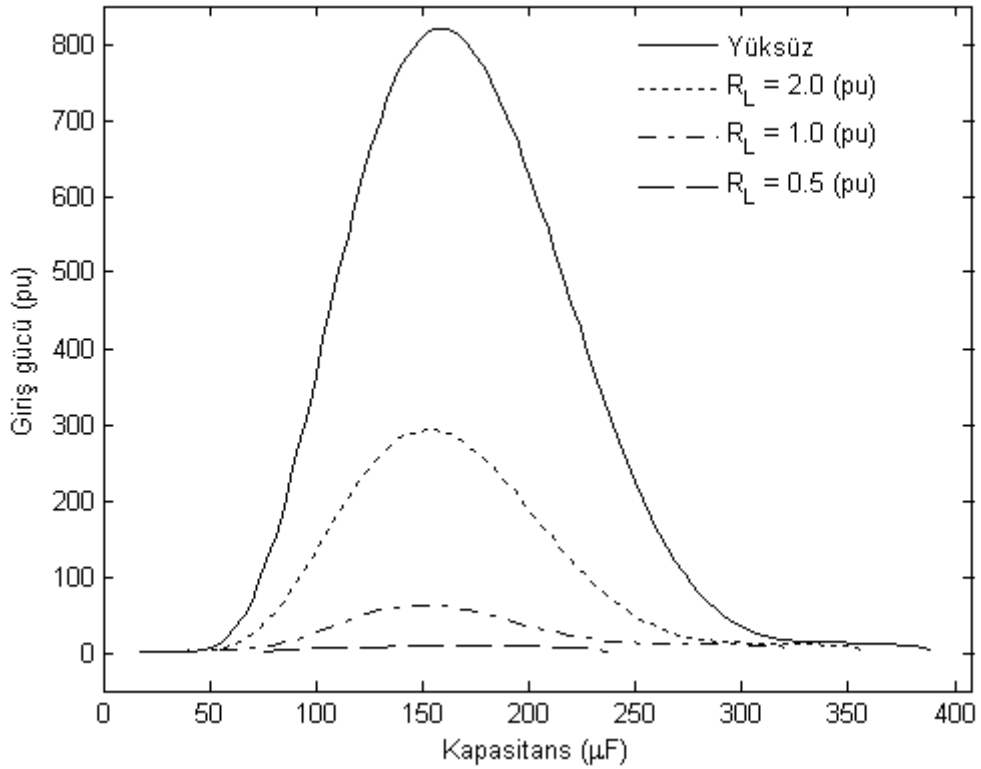
Generatörden maksimum gücün; küçük yüklerde elde edileceği, yükün fazla artırıldığında güç alınamayacağı ve maksimum çıkış gücü elde etmede kapasitanstın belli bir değerinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $P_C$ ' nin Değişimi

Şekil 4.7’ de kapasitanstaki değişmeye karşılık generatör giriş gücündeki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Asenkron generatörün yüksüz olduğu durumda girişi gücü kapasitansın  $0-400\mu F$  aralığında değişmesine karşılık, belli değerinden başlayarak yükselmekte, bu yükselme  $800$  pu değerinde maksimuma ulaşmakta sonra tekrar azalarak sifıra inmektedir.  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durumda benzer değişim gözlenmekte fakat giriş gücü maksimum  $300$  pu değerine ulaşabilmektedir.  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durumda benzer değişim gözlenmekte fakat giriş gücü maksimum  $50$  pu değerine ulaşabilmektedir.  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durumda giriş gücünün oluşmadığı gözlemlenmektedir.

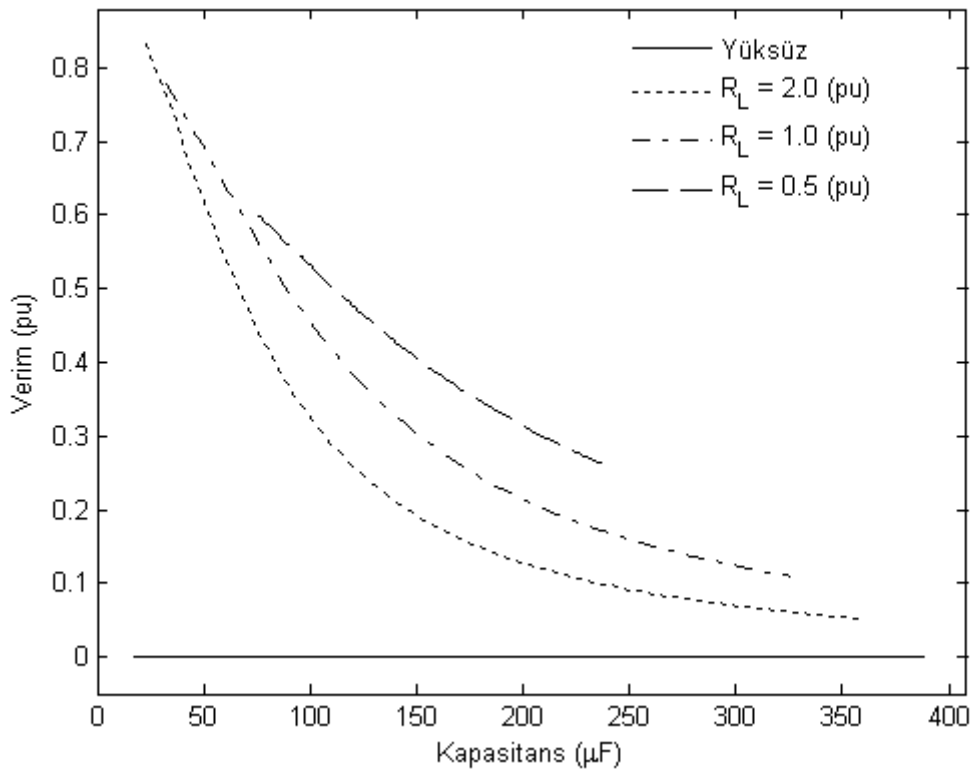


Şekil 4.7 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $P_G$ ' nin Değişimi

Şekil 4.8’ de kapasitansdaki değişmeye karşılık generatör verimindeki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Generatör yüksüz iken çıkış gücü sıfır dolayısı ile verim de sıfırdır, bu durum grafikten de görülmektedir.  $R_L=2,0$  pu yükünde kapasitansın en küçük değerinde verim en büyük, kapasitansın artmasıyla verim azalmıştır.  $R_L=1,0$  pu yükünde benzer değişim görülmesine rağmen verim fazla azalmamıştır.  $R_L=0,5$  pu yükünde kapasitansın yaklaşık 100-250  $\mu\text{f}$  aralığında verim alınmış, verimde yine azalma görülmüş fakat bu değer 0,3’ lerin altına inmemiştir.

Bu çalışmadan şu sonuç çıkarılabilir. Generatörden yüksek verim almak için kapasitansın ve yükün bir minimum ve maksimum değeri mevcuttur. Bu aralıkta çalışan generatörden maksimum verim elde edilebilir.

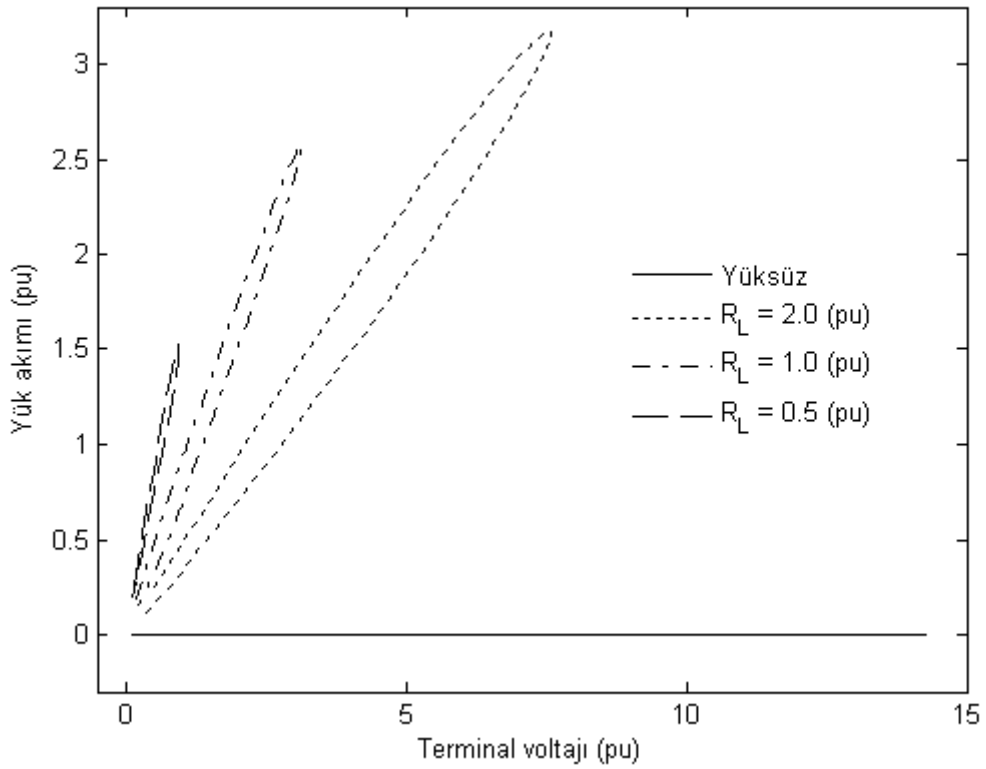


Şekil 4.8 Üç Ayrı Omik Yükte Kapasitansdaki Değişmeye Karşılık  $\eta$ ' nin Değişimi

Şekil 4.9’ da terminal voltajındaki değişmeye karşılık generatör yük akımındaki değişimin grafiği görülmektedir. Grafik generatör hızı  $v = 1$  pu değerinde sabit tutularak; yüksüz durum,  $R_L=2,0$  pu omik yüklü durum,  $R_L=1,0$  pu omik yüklü durum ve  $R_L=0,5$  pu omik yüklü durum için ayrı ayrı elde edilerek aynı şekil üzerinde çizilmiştir.

Omik yüklü durumda terminal voltajının örneğin 1 pu değerinde en büyük akım, 0,5 pu yükünde elde edilmiş ve bunu sırasıyla 1,0 pu ve 2,0 pu yüklerindeki akımlar takip etmiştir.

Terminal voltajı teorik olarak artırıldığında ise şekilden de görüldüğü gibi bu defa en büyük akım değerine 2,0 pu yükünde ulaşılacağı görülmektedir.



Şekil 4.9 Üç Ayrı Omik Yükte  $V_T$ ' deki Değişmeye Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

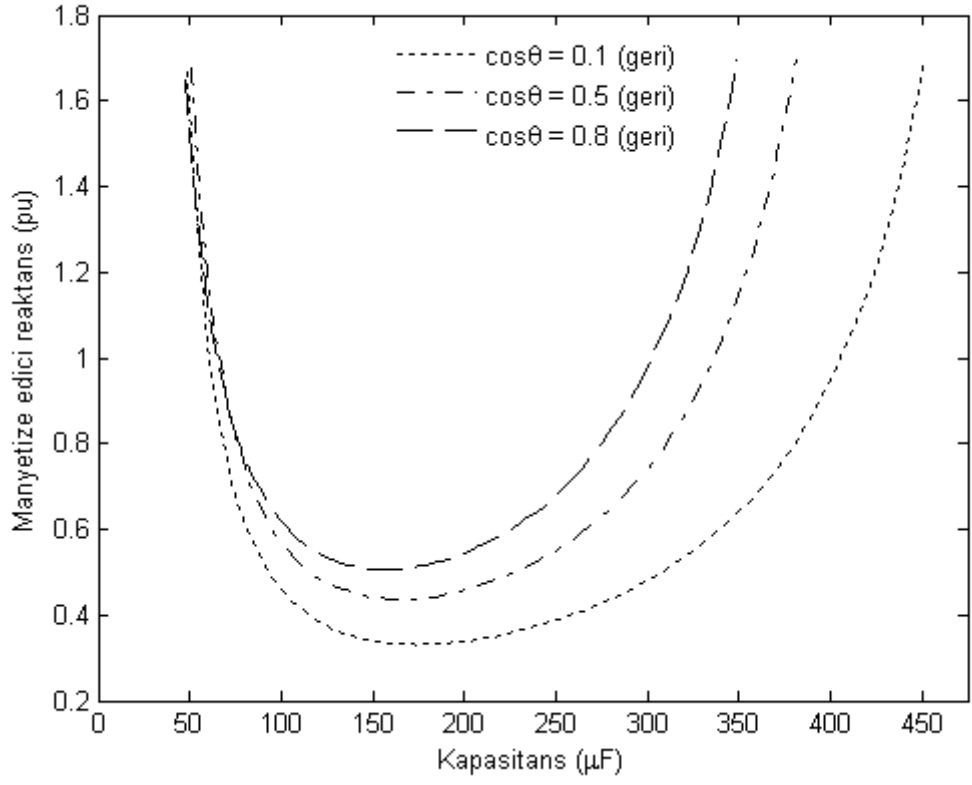
## 4.2. ENDÜKTİF YÜKLÜ DURUM

Generatör uçlarına endüktif yük bağlı iken asenkron generatörün parametreleri incelenmiştir. Üç ayrı yük için hesaplamalar ayrı ayrı tekrarlanarak sonuçları aynı grafikte gösterilmiş böylece değişen yük koşullarında sonuçların değerlendirilmesi olanağı sağlanmıştır. Endüktif yüklerde devre akımı gerilime göre geri kalmaktadır. Bu olay  $\cos\theta$  (geri) olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.10' da sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün manyetize edici reaktansındaki değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken elde edilen eğri omik yüklü çalışmadaki eğrinin aynısıdır. Generatör  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde bir miktar sağ tarafa kaydığı görülmektedir. Generatör  $\cos\theta=0,5$  (geri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde bir miktar daha sağ tarafa kaydığı görülmektedir. Generatör  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde en sağ tarafa kaydığı görülmektedir.

Terminal voltajı elde etmek için mıknatıslanma reaktansının küçük değerler alması gerektiği göz önünde bulundurulursa, uyartım kapasitörünün bir minimum ve maksimum değerinin olduğu açıkça görülmektedir. Bu aralık yüksüz durumda en geniştir. Terminal voltajının en büyük değerine ulaşması bütün yük değerlerinde özel bir kapasitans değerinde gerçekleşmiştir. Bu özel değer endüktif yüklerle birlikte yatay ekseninde sağ tarafa doğru kaymıştır. En büyük gerilim değerleri Generatör yüksüz çalışırken elde edilmiştir.

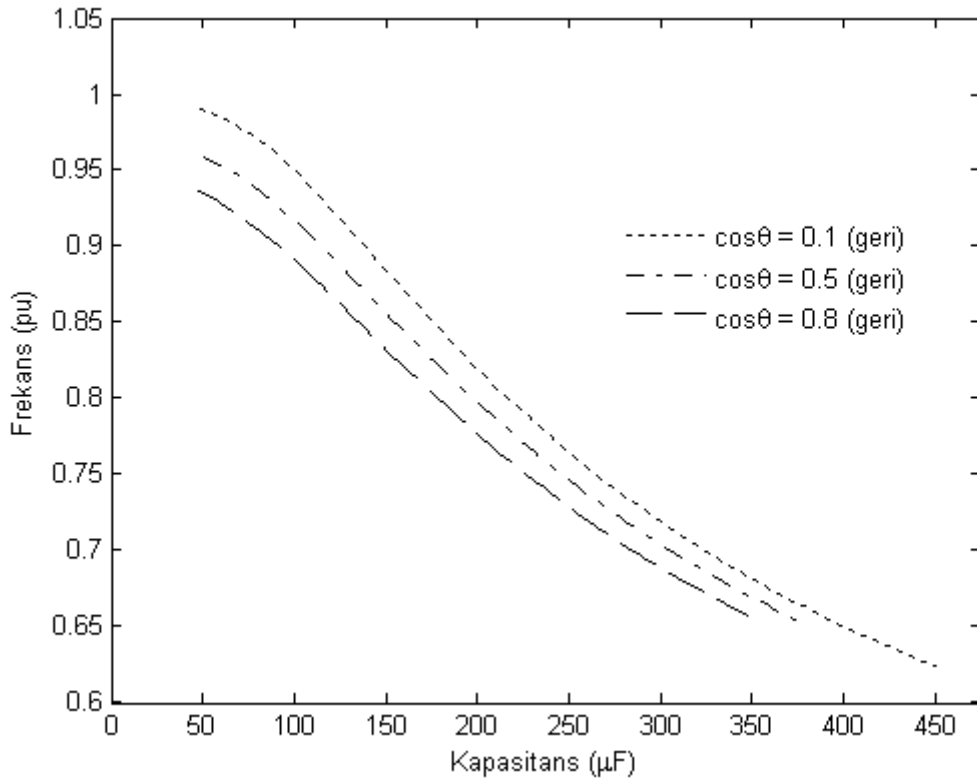


Şekil 4.10 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $X_M'$  nin Değişimi

Şekil 4.11’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün frekansındaki değişimi görülmektedir.

Bu çalışmada kapasitör değeri 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değiştirilerek generatör frekansındaki değişim gözlenmiştir. Görülüyor ki generatör yüksüz durumda kapasitörün minimum değerlerinde  $F=1$  pu değerinde iken kapasitör değeri arttıkça frekans azalarak  $F=0,62$  pu seviyelerine kadar düşmüştür. Aynı işlemler Değişik endüktif yüklerde tekrarlandığında yüklendikçe frekansın düştüğü ve kapasitör değeri artırıldığında frekansın yaklaşık olarak  $F=0,62$  pu değerine kadar düştüğü şekilden açıkça görülmektedir.

Bu çalışmadan generatör frekansının kapasitör değerine ve yüke bağlı olarak belli oranda değiştiği, bu değişimin yük arttıkça ve kapasitans arttıkça azalan yönde olduğu görülmektedir.

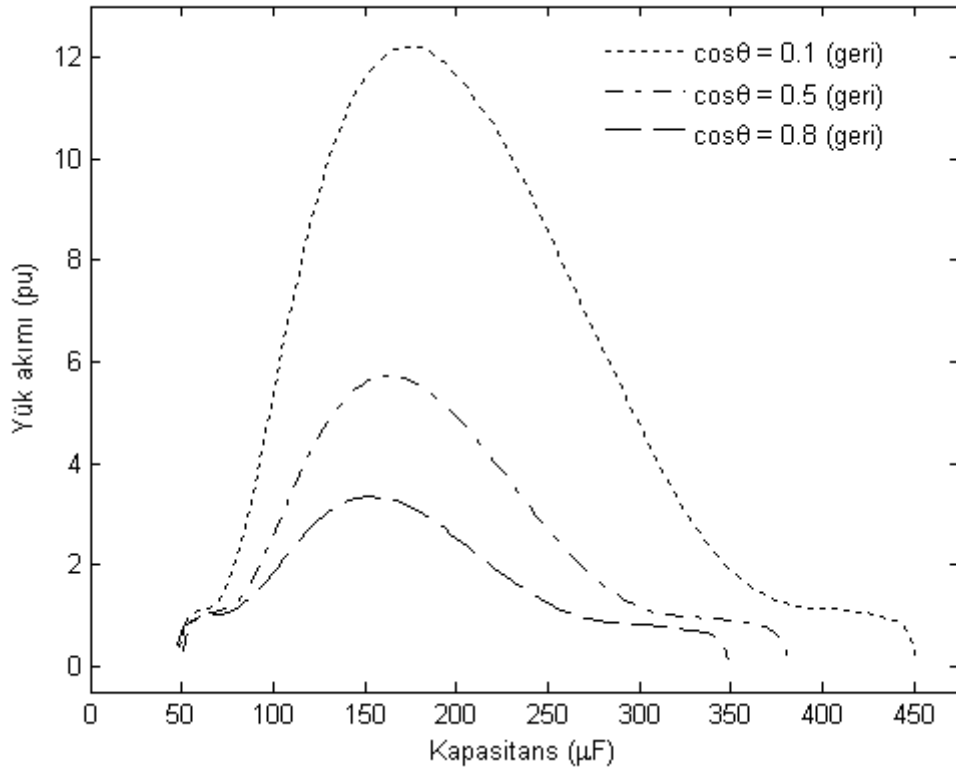


Şekil 4.11 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitansdaki Değişmeye Karşılık  $f'$  ' nin Değişimi

Şekil 4.12’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün yük akımındaki değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken yük akımı 0 değerinde sabittir.  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde yük akımının maksimum değerinde ulaştığı ve değer in kapasitörün belli değerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $\cos\theta=0,5$  (geri) yükünde yük akımının benzer bir değişim gösterdiği fakat daha büyük değerlere ulaşabildiği, yine bu akımın belli kapasite değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükünde yük akımının daha büyük değerlere ulaşabildiği görülmektedir.

Maksimum yük akımı elde etmek için kullanılacak kapasitörün, bir özel değerinin olduğu ve bu değer in endüktif yük ile birlikte artış gösterdiği yapılan çalışmadan açık bir şekilde görülmektedir.

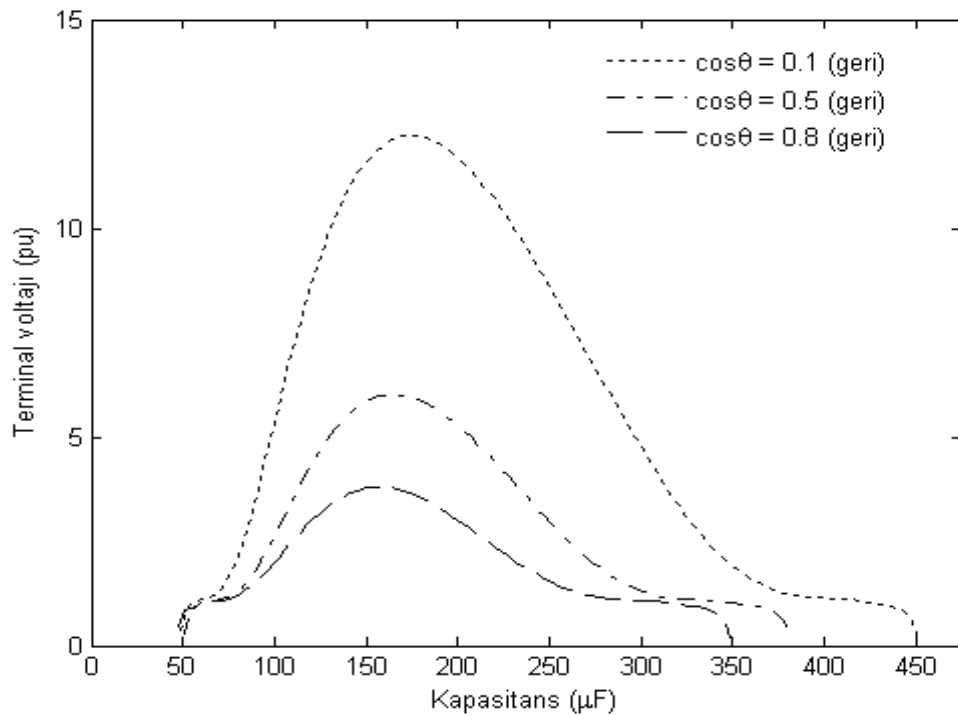


Şekil 4.12 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

Şekil 4.13’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün stator sargı uçlarındaki terminal geriliminin değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile terminal voltajı kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,1$  (geri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum değer artmaktadır.

Bu çalışmadan terminal gerilimi elde etmek için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin özel bir değerde gerçekleştiği ve endüktif yük arttıkça ihtiyacı duyulan kapasitans değerinin de artış gösterdiği açıkça görülmektedir.

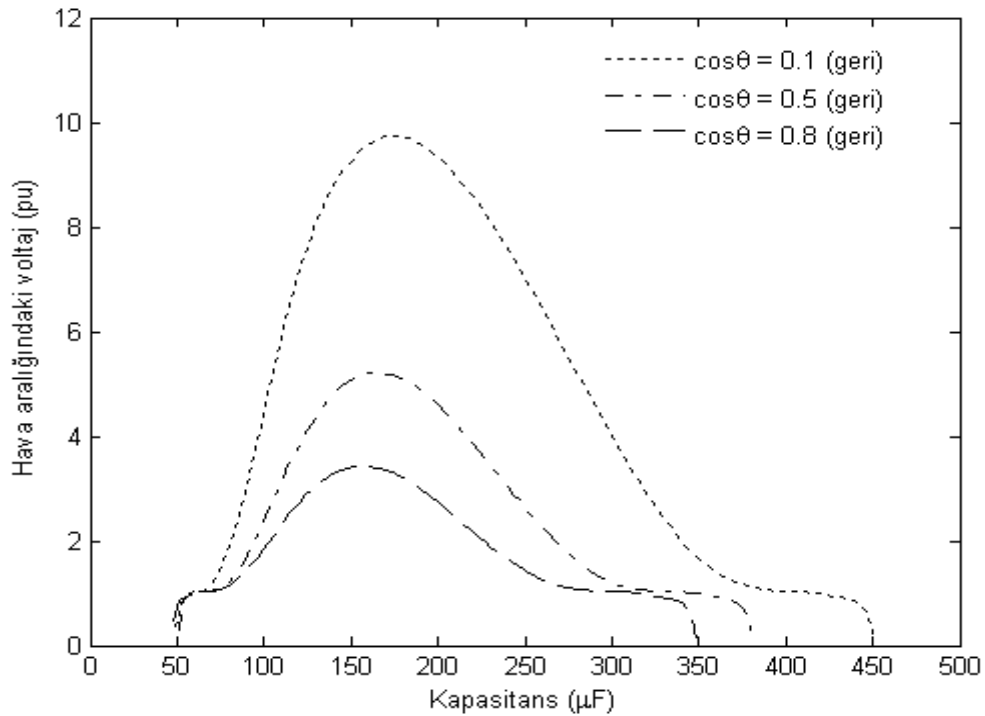


Şekil 4.13 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $V_T$ ' nin Değişimi

Şekil 4.14’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün hava aralığındaki geriliminin değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile hava aralığındaki voltaj, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,1$  (geri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum değer artmaktadır.

Bu çalışmadan hava aralığında gerilim oluşması için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin özel bir değerde gerçekleştiği ve endüktif yük arttıkça ihtiyacı duyulan kapasitans değerinin de artış gösterdiği açıkça görülmektedir.

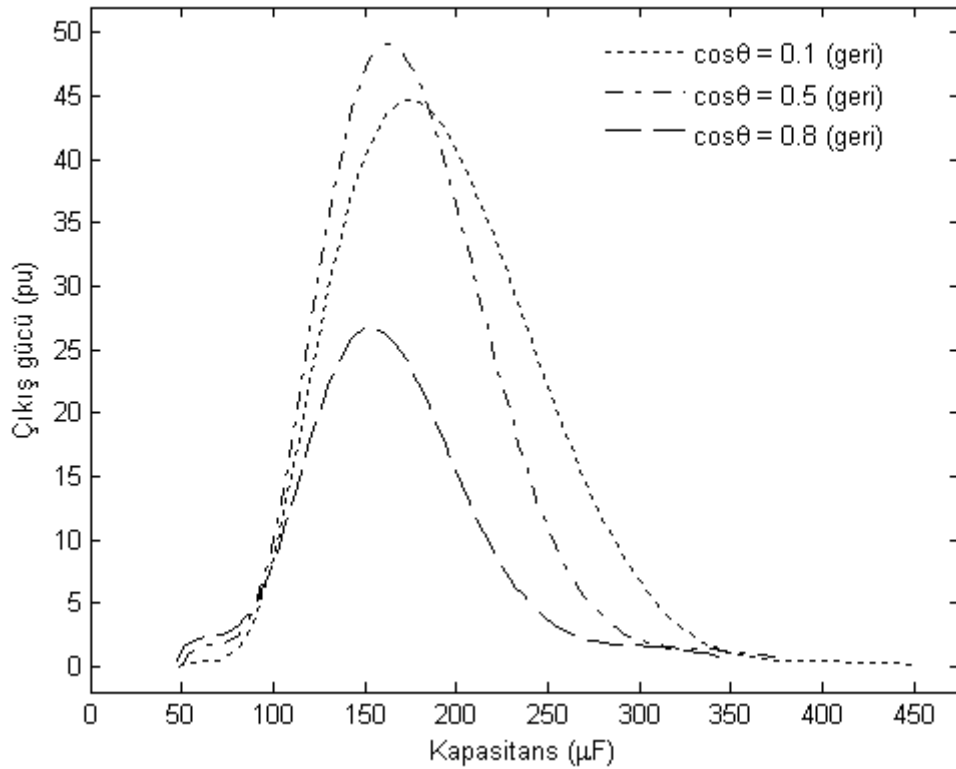


Şekil 4.14 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $V_G$ ’ nin Değişimi

Şekil 4.15’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün çıkış gücündeki değişim görülmektedir.

Generatör yüksüz iken çıkış gücünden söz edilemez ve sıfırdır.  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile çıkış gücü, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra sıfıra inmektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,5$  (geri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat çıkış gücü maksimum olmaktadır.  $\cos\theta=0,1$  (geri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat çıkış gücünün ulaştığı maksimum değer azalmaktadır.

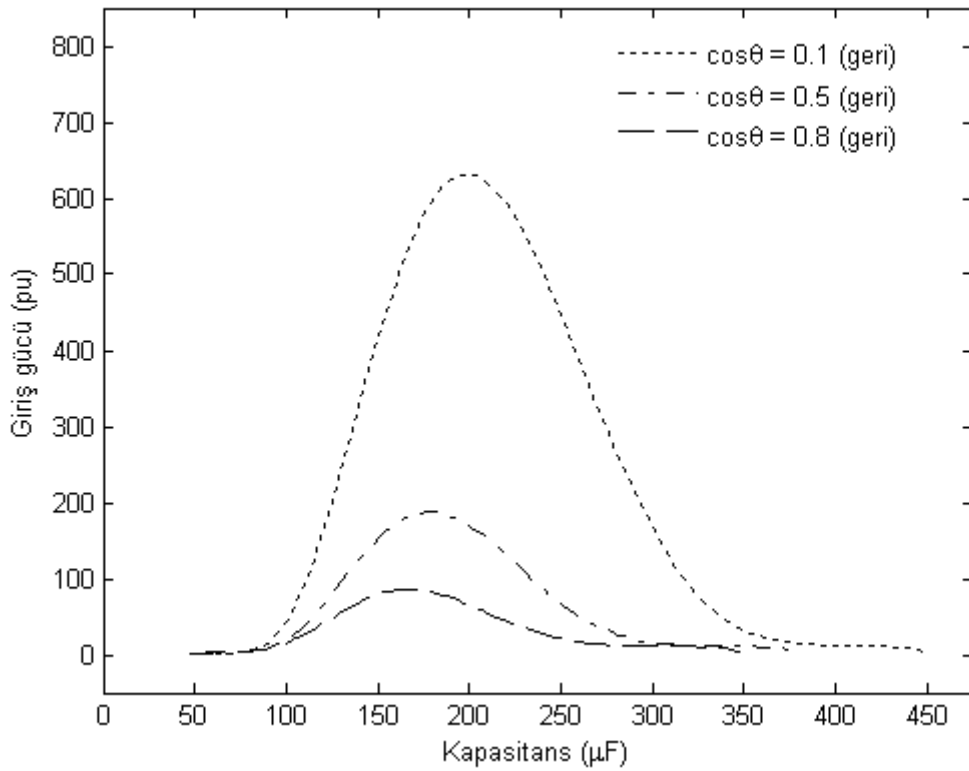
Bu çalışmadan maksimum çıkış gücü için kapasitansın özel bir değerinin olduğu, fakat endüktif yük arttıkça ihtiyaç duyulan kapasitans değerinin de artış gösterdiği ve yükün belli değerlerinde maksimum güç elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.15 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitansdaki Değişmeye Karşılık  $P_c$ ' nin Değişimi

Şekil 4.16' da sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün giriş gücündeki değişimi görülmektedir.

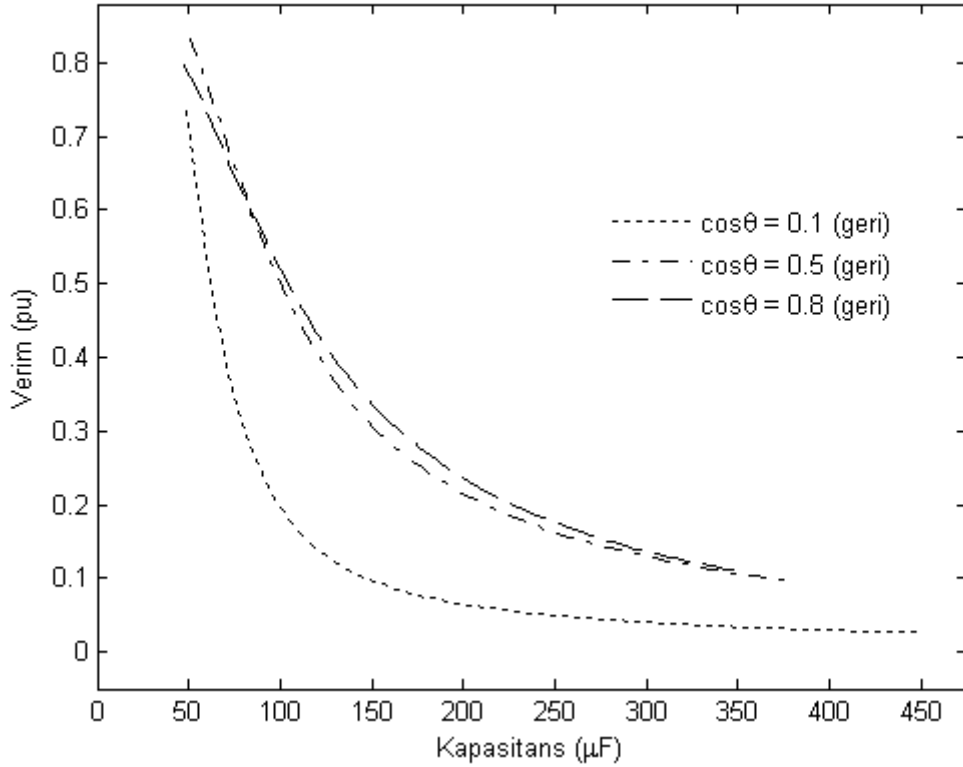
Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile giriş gücü, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra sıfıra inmektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat eğrinin yatay ekseninde en sağ tarafa kaydığı ve giriş gücünün azaldığı görülmektedir.  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yüklerinde eğri yatay ekseninde sağa kaymış olduğu ve küçüldüğü görülmektedir.



Şekil 4.16 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitansdaki Değişmeye Karşılık  $P_G$ ' nin Değişimi

Şekil 4.17' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün verimindeki değişimi görülmektedir.

Boşta çalışan generatörün çıkış gücü sıfır olacağından verimi de sıfırdır. Bu durum grafikte düz çizgi ile belirtilmiştir.  $\cos\theta=0,1$  (geri) endüktif yükünde kapasitansın belli değerinde verim 0,8 gibi en yüksek değerini almış, kapasitans arttıkça hızlı bir şekilde düşerek sıfıra yaklaşmıştır. Diğer yüklerde de benzer değişim görülmesine rağmen örneğin 100  $\mu\text{F}$  değerinde yaklaşık 6 kat fazla verim görülmektedir. Rezistif yüklere göre verim eğrileri yatay eksende sağ tarafa kaydığı açıkça görülmektedir.

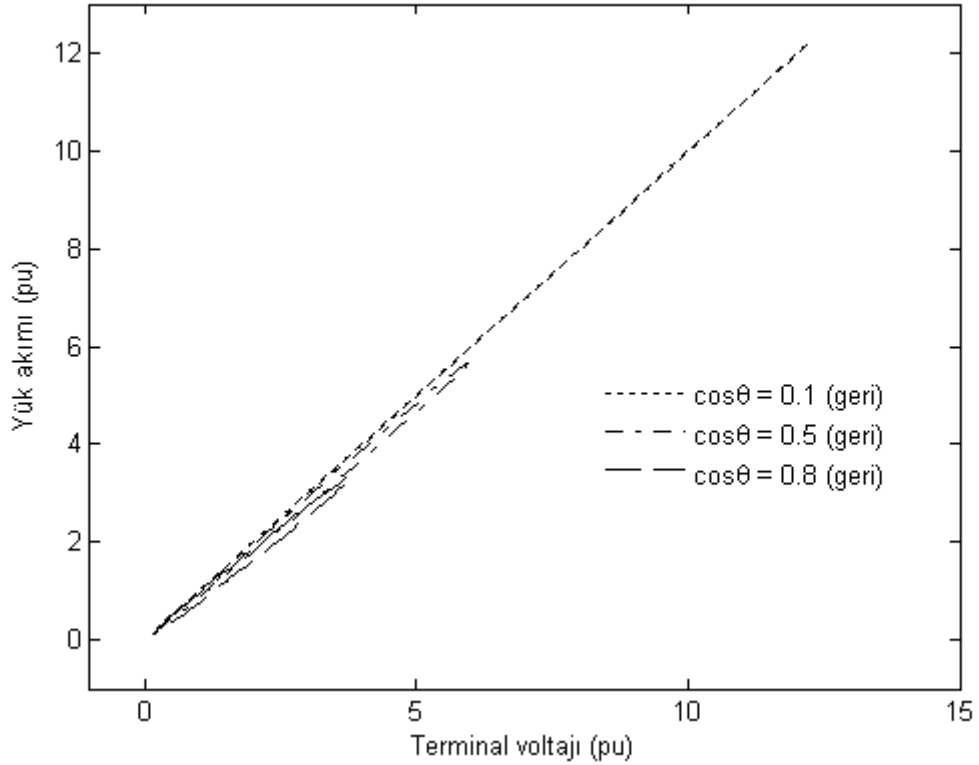


Şekil 4.17 Üç Ayrı Endüktif Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $\eta$ ' nin Değişimi

Şekil 4.18' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör terminal voltajının 0-15 pu aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün yük akımındaki değişimi görülmektedir.

Endüktif yüklü durumda terminal voltajının örneğin 4 pu değerinde en büyük akım,  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükünde elde edilmiş ve bunu sırasıyla  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yüklerindeki akımlar takip etmiştir.

Terminal voltajı teorik olarak artırıldığında ise şekilden de görüldüğü gibi, en büyük akım değerine  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükünde ulaşılacağı görülmektedir.



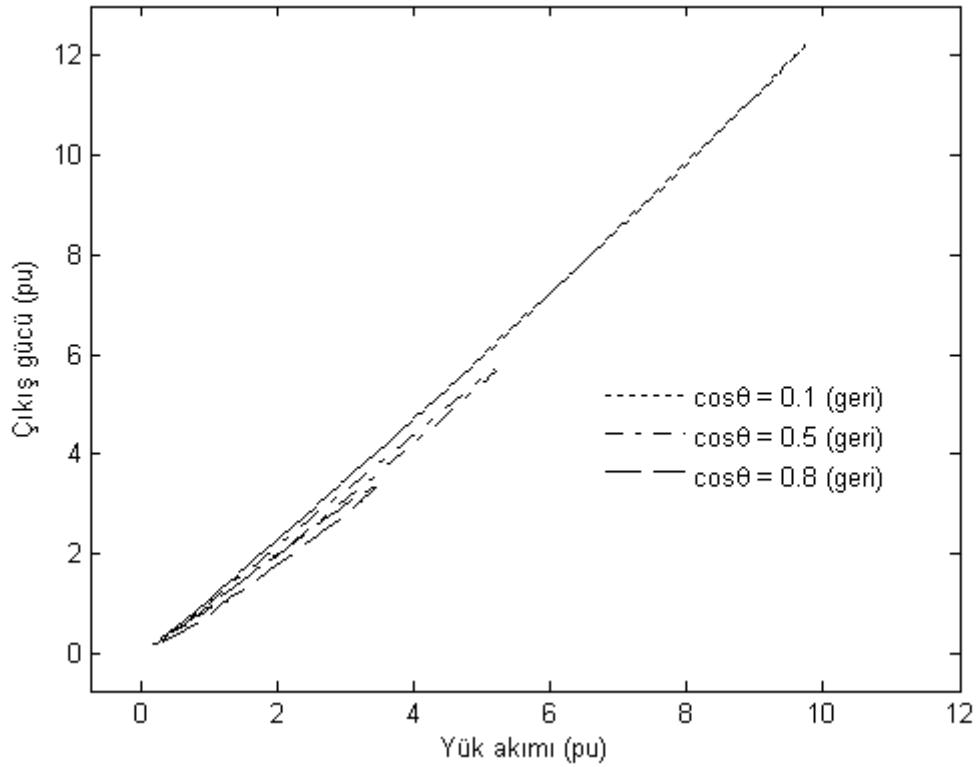
Şekil 4.18 Üç Ayrı Endüktif Yükte  $V_T$ ' deki Değişmeye Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

Şekil 4.19’ da sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör yük akımındaki 0-12 pu aralığında değişimine karşılık yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (geri),  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükleri için asenkron generatörün çıkış gücündeki değişimi görülmektedir.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,1$  (geri) yükünde bütün yük akımlarında fazla gerçekleşerek akımın 10 pu değerinde, çıkış gücü 12 pu değerine ulaşmaktadır.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,5$  (geri) yükünde düşerek, akımın 10 pu değerinde, çıkış gücü maksimum 5 pu değerine ulaşmaktadır.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde daha da azalarak, akımın 3,5 pu değerinde, çıkış gücü maksimum 3,5 pu değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.19 Üç Ayrı Endüktif Yükte  $I_L$ ' deki Değişmeye Karşılık  $P_C$ ' nin Değişimi

### 4.3. KAPASİTİF YÜKLÜ DURUM

Generatör uçlarına kapasitif yük bağlı iken asenkron generatörün parametreleri incelenmiştir. Üç ayrı yük için hesaplamalar ayrı ayrı tekrarlanarak sonuçları aynı grafikte gösterilmiş böylece değişen yük koşullarında sonuçların değerlendirilmesi olanağı sağlanmıştır. Kapasitif yüklerde devre akımı gerilime göre ileride olmaktadır. Bu olay  $\cos\theta$  (ileri) olarak ifade edilmiştir.

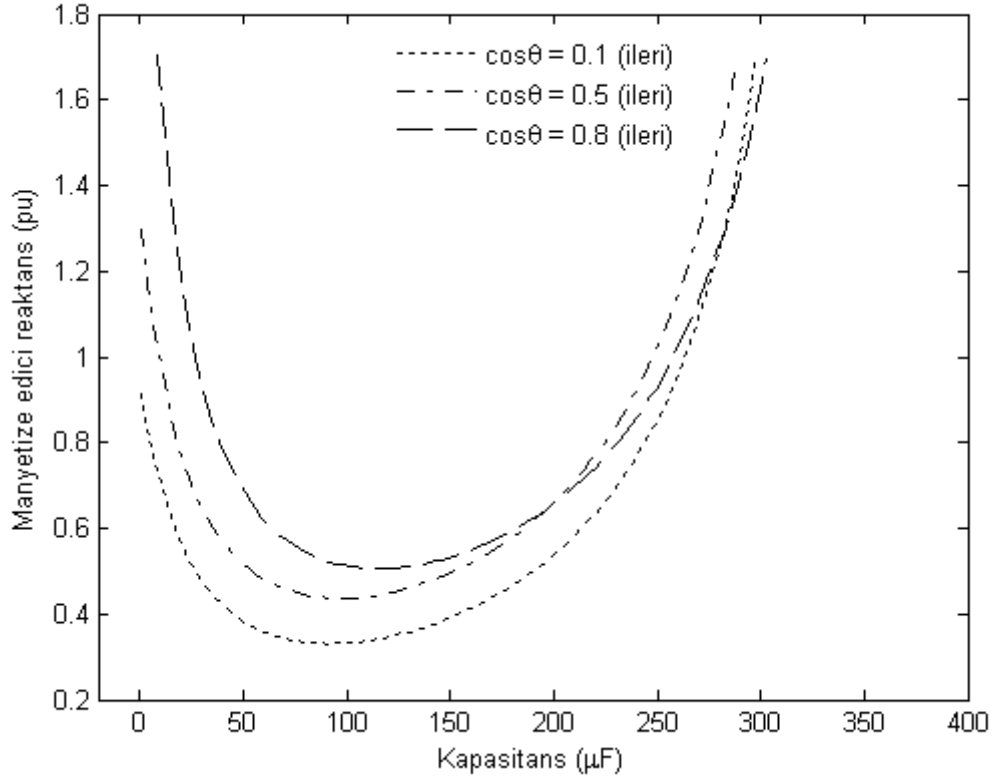
Şekil 4.20' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün mıknatıslanma reaktansındaki değişimi görülmektedir.

Terminal gerilimi elde etmek için yine bir minimum ve maksimum değer olduğu açıkça görülmektedir. Bu aralık yüksüz durumda en geniştir. Terminal geriliminin en büyük değerine ulaşması bütün yük değerlerinde özel bir kapasitans değerinde gerçekleşmiştir. En büyük gerilim değerleri generatör yüksüz çalışırken elde edilmiştir. Bu çalışmada kapasitör değeri 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değiştirilerek mıknatıslanma reaktansındaki değişim gözlenmiştir. Görülüyor ki  $X_M$  maksimum değerlerden başlayıp azalarak bir minimum değere ulaşmakta daha sonra yeniden artarak maksimum değerlere çıkmaktadır. Bu değişim motor yüklendikçe daha dar bir alanda gerçekleşmiştir.

Generatör yüksüz iken elde edilen eğri omik yüklü çalışmadaki eğrinin aynısıdır. Generatör  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde bir miktar sol tarafa kaydığı görülmektedir. Generatör  $\cos\theta=0,5$  (ileri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde bir miktar daha sol tarafa kaydığı görülmektedir. Generatör  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükü ile yüklendiğinde ve kapasitansın 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değişimi ile elde edilen grafiğin yatay ekseninde en sol tarafa kaydığı görülmektedir.

Terminal gerilimi elde etmek için mıknatıslanma reaktansının küçük değerler alması gerektiği göz önünde bulundurulursa, uyartım kapasitörünün bir minimum ve

maksimum değerinin olduğu açıkça görölmektedir. Bu aralık yüksüz durumda en geniştir. Terminal geriliminin en büyük değerine ulaşması bütün yük değerlerinde özel bir kapasitans değerinde gerçekleşmiştir. Bu özel değer kapasitif yükle birlikte yatay ekseninde sol tarafa doğru kaymıştır. En büyük gerilim değerleri generatör yüksüz çalışırken elde edilmiştir.

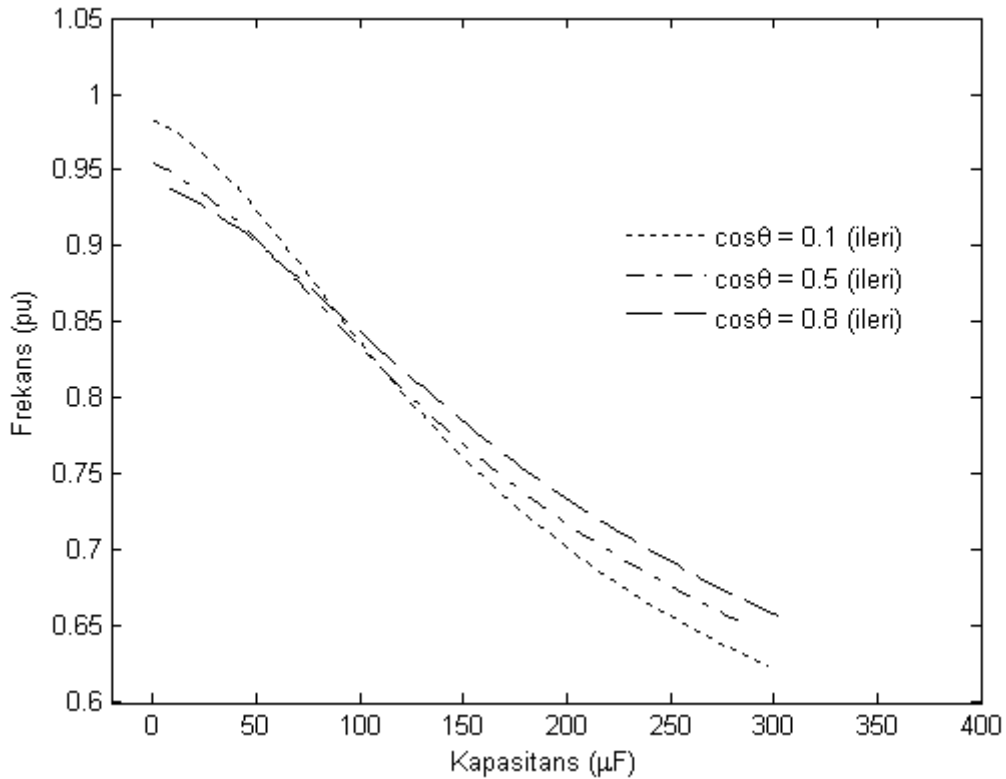


Şekil 4.20 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $X_M$ ' nin Değişimi

Şekil 4.21’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün frekansındaki değişim görülmektedir.

Bu çalışmada kapasitör değeri 0-450  $\mu\text{F}$  aralığında değiştirilerek generatör frekansındaki değişim gözlenmiştir. Görülüyor ki generatör yüksüz durumda kapasitörün minimum değerlerinde  $F=1$  pu değerinde iken kapasitör değeri arttıkça frekans azalarak  $F=0,62$  pu seviyelerine kadar düşmüştür. Aynı işlemler Değişik kapasitif yüklerde tekrarlandığında, yüklendikçe frekansın düştüğü ve kapasitör değeri artırıldığında frekansın yaklaşık olarak  $F=0,62$  pu değerine kadar düştüğü şekilden açıkça görülmektedir.

Bu çalışmadan generatör frekansının kapasitör değerine ve yüke bağlı olarak belli oranda değiştiği, bu değişimin yük arttıkça ve kapasitans arttıkça azalan yönde olduğu görülmektedir.

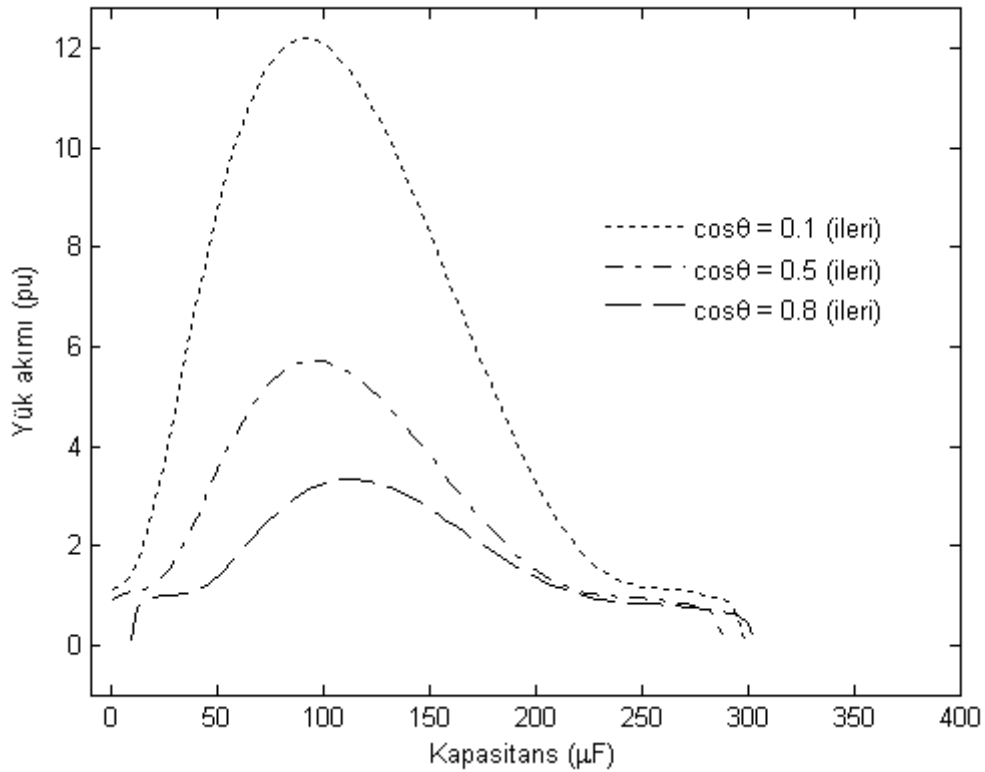


Şekil 4.21 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık f ' nin Değişimi

Şekil 4.22’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün yük akımındaki değişim görülmektedir.

Generatör yüksüz iken yük akımı 0 değerinde sabittir.  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükünde yük akımının maksimum değerinde ulaştığı ve değerin kapasitörün belli değerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $\cos\theta=0,5$  (ileri) yükünde yük akımının benzer bir değişim gösterdiği fakat daha büyük değerlere ulaşabildiği, yine bu akımın belli kapasite değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir.  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükünde yük akımının daha büyük değerlere ulaşabildiği görülmektedir.

Maksimum yük akımı elde etmek için kullanılacak kapasitörün, bir özel değerinin olduğu ve bu değer kapasitif yükle birlikte azalma gösterdiği yapılan çalışmadan açık bir şekilde görülmektedir.

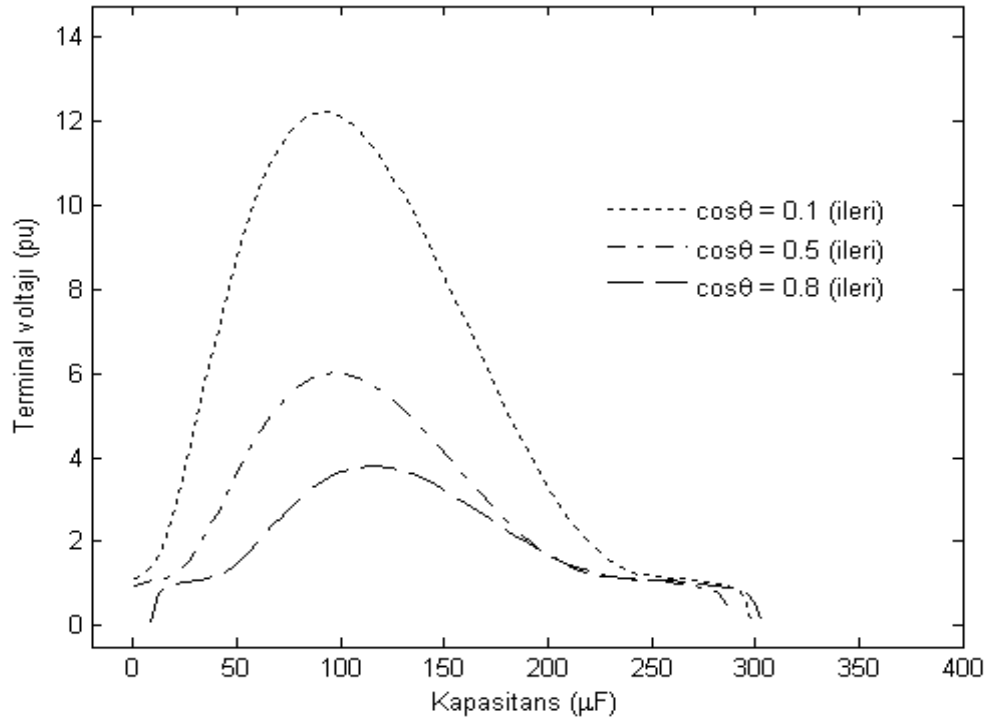


Şekil 4.22 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

Şekil 4.23' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün terminal voltajındaki değişim görülmektedir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-400  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile terminal voltajı kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,8$  (geri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $\cos\theta=0,5$  (geri) ve  $\cos\theta=0,1$  (geri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum değer artmaktadır.

Bu çalışmadan terminal gerilimi elde etmek için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin özel bir değerde gerçekleştiği ve kapasitif yük arttıkça ihtiyaç duyulan kapasitans değerinin de azalma gösterdiği açıkça görülmektedir.

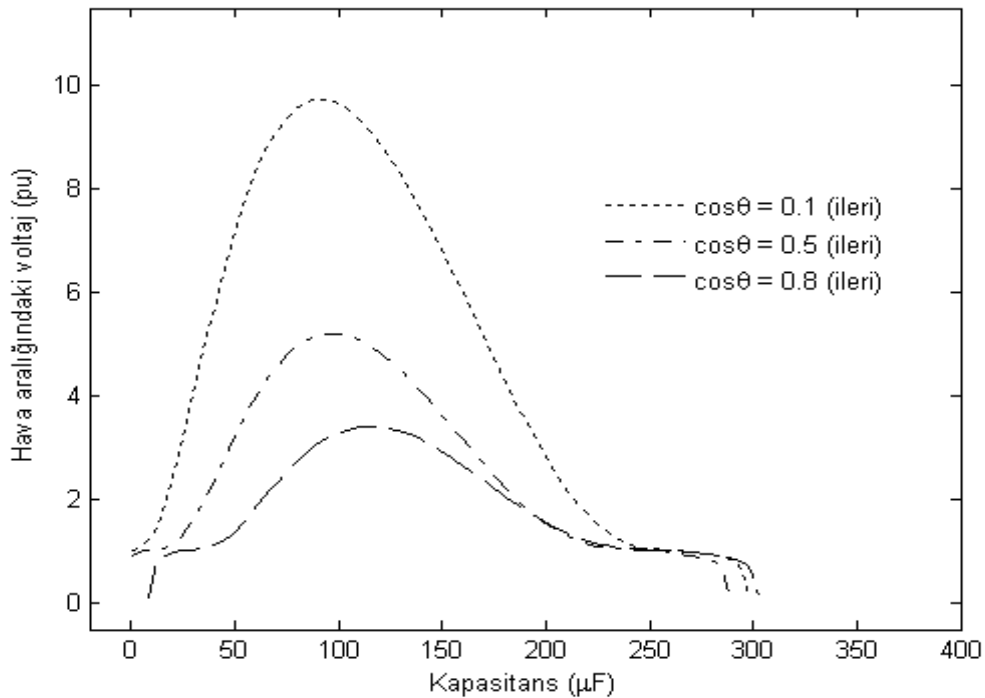


Şekil 4.23 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $V_T$ ' nin Değişimi

Şekil 4.24’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün hava aralığındaki voltajın değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-400  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile hava aralığındaki voltaj, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında terminal voltajı azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra voltaj ölçülememektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum voltaj seviyesi düşmüştür.  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat terminal voltajının ulaştığı maksimum değer artmaktadır.

Bu çalışmadan hava aralığında gerilim oluşması için kapasitansın minimum ve maksimum değerinin olduğu, fakat en yüksek gerilimin özel bir değerde gerçekleştiği ve kapasitif yük arttıkça iktiyaç duyulan kapasitans değerinin de azalma gösterdiği açıkça görülmektedir.

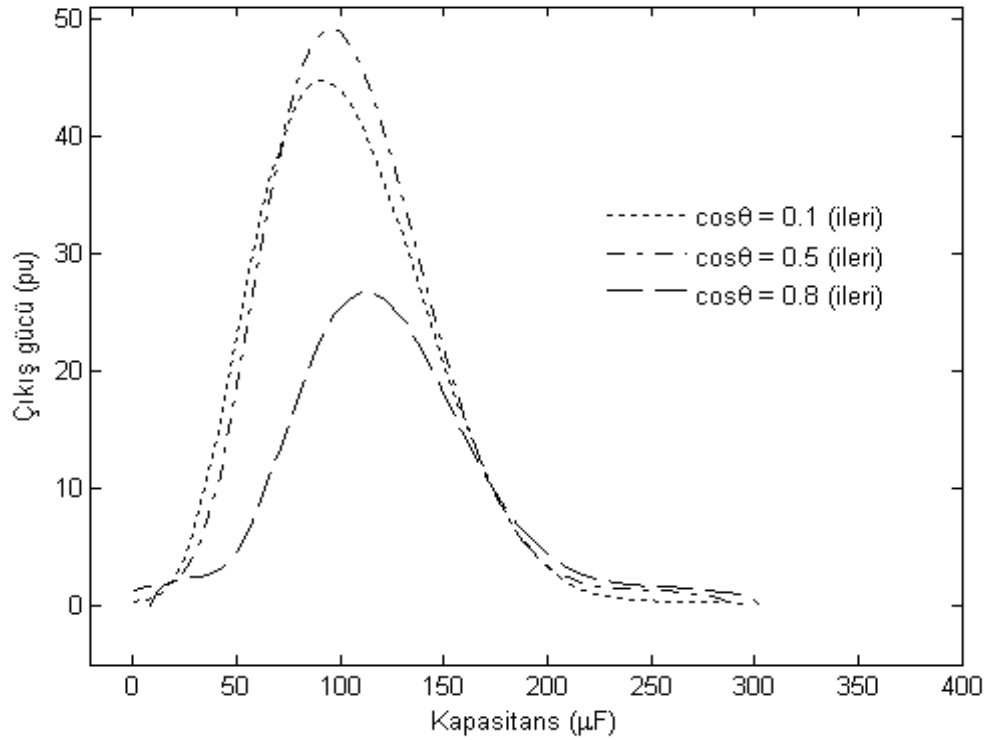


Şekil 4.24 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $V_G$ ' nin Değişimi

Şekil 4.25’ de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün çıkış gücündeki değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken çıkış gücünden söz edilemez ve sıfırdır.  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükünde kapasitansın 0-400  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile çıkış gücü, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra sıfıra inmektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,5$  (ileri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat çıkış gücü maksimum olmaktadır.  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yüklerinde de benzer değişim görülmekte fakat çıkış gücünün ulaştığı maksimum değer azalmaktadır.

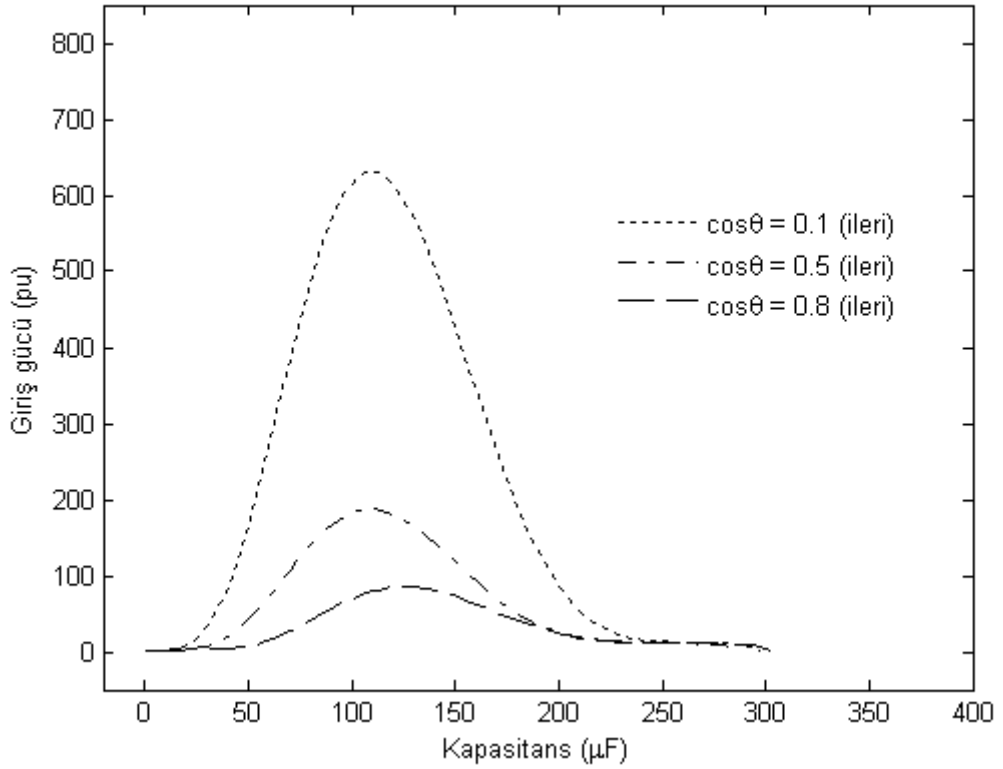
Bu çalışmadan maksimum çıkış gücü için kapasitansın özel bir değerinin olduğu, fakat kapasitif yük arttıkça ihtiyaç duyulan kapasitans değerinin de azalma gösterdiği ve yükün belli değerlerinde maksimum güç elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.25 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $P_{\text{ç}}$ ' nin Değişimi

Şekil 4.26’ da sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün giriş gücüneki değişimi görülmektedir.

Generatör yüksüz iken kapasitansın 0-400  $\mu\text{F}$  aralığındaki değişimi ile giriş gücü, kapasitörün belli değerinde artmaya başlamış bu artış kapasitansın artmasıyla hızla artarak maksimum değerine ulaşmakta ve yine artan kapasitans karşısında azalmakta, kapasitansın belli değerinden sonra sıfıra inmektedir. Aynı çalışma  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükünde yapıldığında değişim benzer şekilde olmakta fakat eğrinin yatay ekseninde en sol tarafa kayadığı ve giriş gücünün azaldığı görülmektedir.  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yüklerinde eğri yatay ekseninde sola kaymış olduğu ve küçüldüğü görülmektedir.

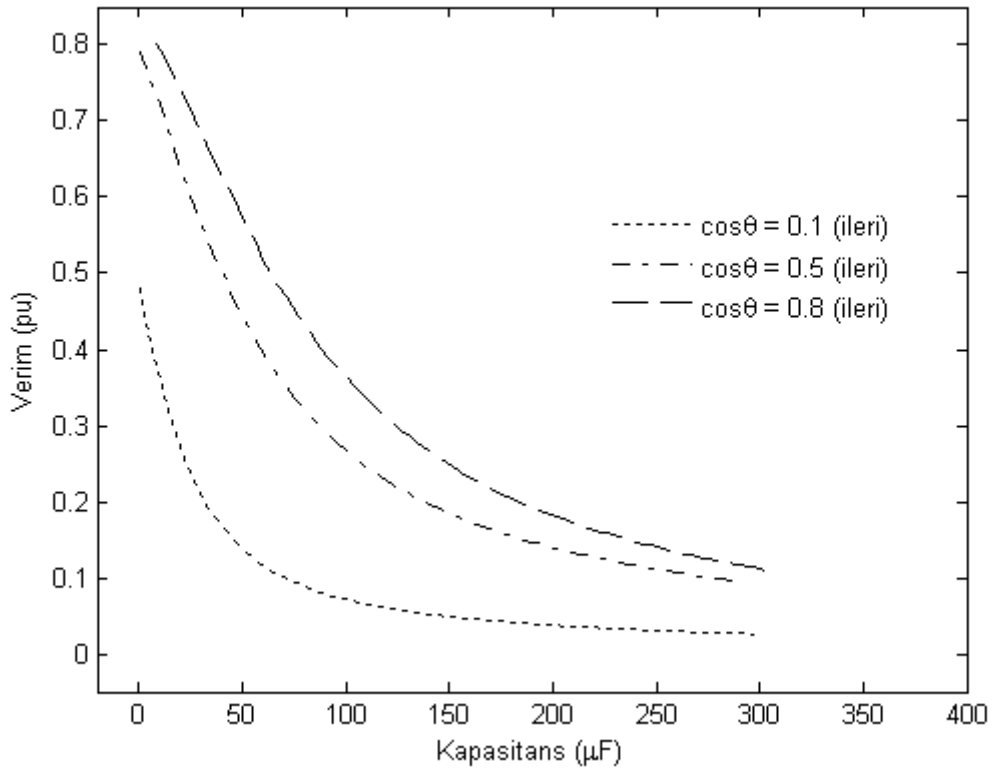


Şekil 4.26 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapsitanstaki Değişmeye Karşılık  $P_G$ ' nin Değişimi

Şekil 4.27' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatör uçlarına bağlı kapasitörün 0-400  $\mu\text{F}$  aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün verimindeki değişim görülmektedir.

Boşta çalışan generatörün çıkış gücü sıfır olacağından verimi de sıfırdır. Bu durum grafikte düz çizgi ile belirtilmiştir.  $\cos\theta=0,1$  (ileri) endüktif yükünde kapasitansın belli değerinde verim 0,5 gibi en yüksek değerini almış, kapasitans arttıkça hızlı bir şekilde düşerek sıfıra yaklaşmıştır. Diğer yüklerde de benzer değişim görülmesine rağmen en yüksek verimin 0,8 olduğu ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükündeki verimin diğer yüklerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Ayrıca rezistif yüklerle göre verim eğrileri yatay ekseninde sol tarafa kaydığı açıkça görülmektedir.

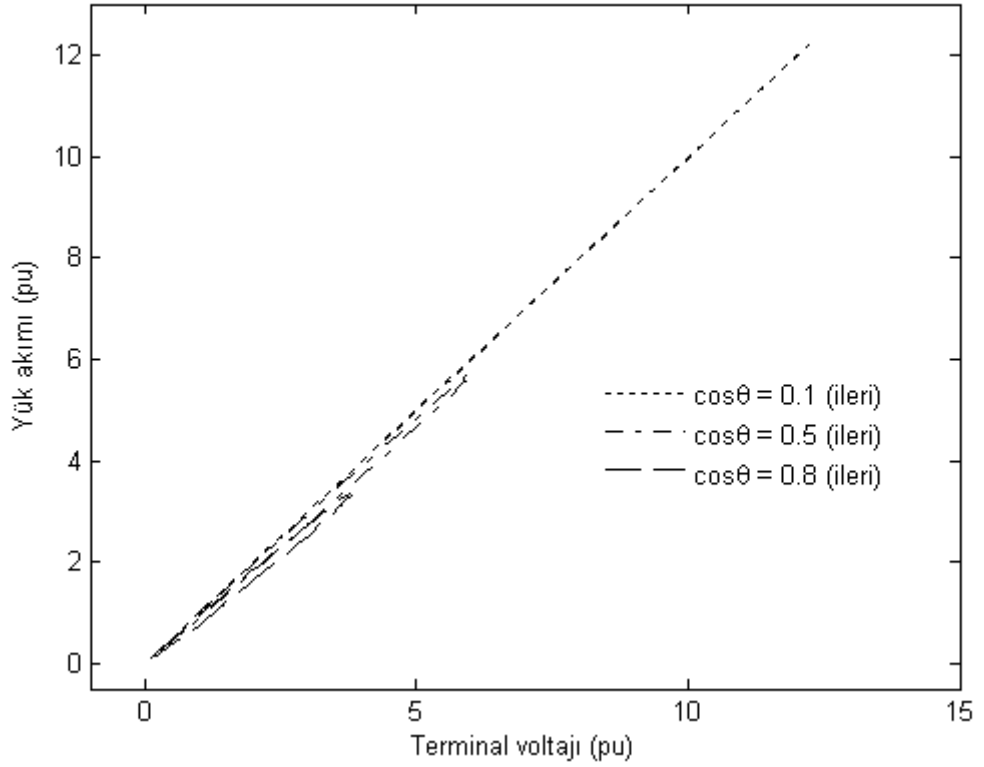


Şekil 4.27 Üç Ayrı Kapasitif Yükte Kapasitansın Verim Üzerindeki Etkisini Gösteren Bir Grafik

Şekil 4.28' de sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatörün terminal uçlarındaki voltajın 0-15 pu aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün yük akımındaki değişimi görülmektedir.

Kapasitif yüklü durumda terminal voltajının örneğin 4 pu değerinde en büyük akım,  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükünde elde edilmiş ve bunu sırasıyla  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yüklerindeki akımlar takip etmiştir.

Terminal voltajı teorik olarak artırıldığında ise şekilden de görüldüğü gibi, en büyük akım değerine  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükünde ulaşılacağı görülmektedir.



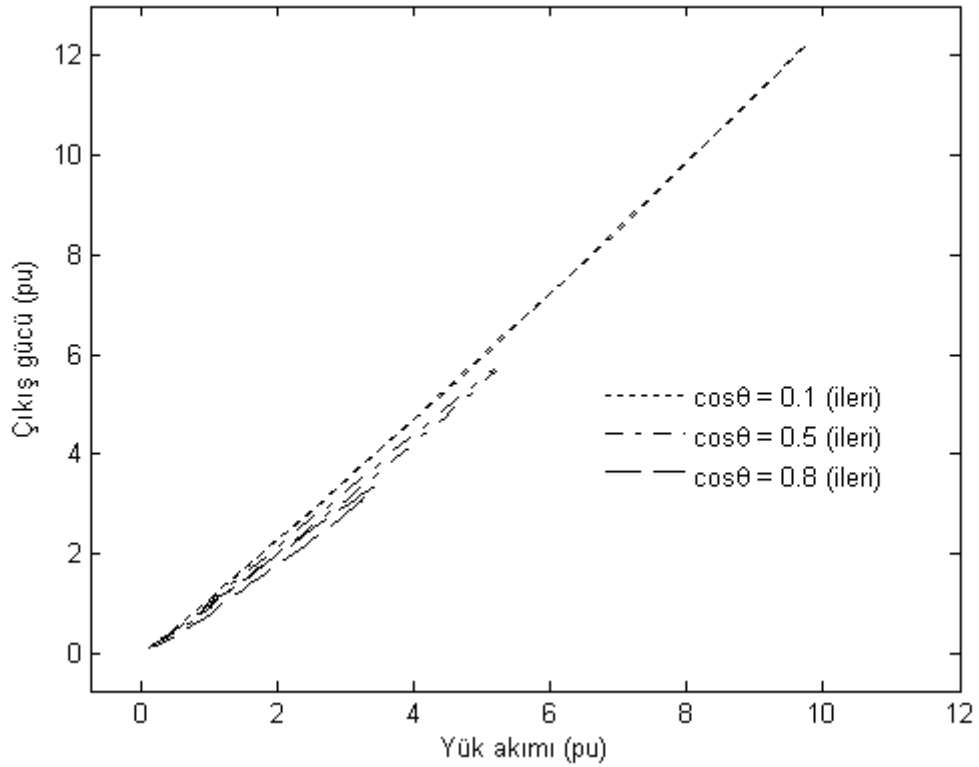
Şekil 4.28 Üç Ayrı Kapasitif Yükte  $V_T$ ' nin Değişmesine Karşılık  $I_L$ ' nin Değişimi

Şekil 4.29’ da sabit hızda ( $v = 1$  pu) generatörün yük akımının 0-12 pu aralığında değişimine karşılık; yüksüz,  $\cos\theta=0,1$  (ileri),  $\cos\theta=0,5$  (ileri) ve  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükleri için asenkron generatörün çıkış gücündeki değişimi görülmektedir.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,1$  (ileri) yükünde bütün yük akımlarında fazla gerçekleşerek akımın 10 pu değerinde, çıkış gücü 12 pu değerine ulaşmaktadır.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,5$  (ileri) yükünde düşerek, akımın 5,5 pu değerinde, çıkış gücü maksimum 5,5 pu değerine ulaşmaktadır.

Asenkron generatörün çıkışından alınan güç  $\cos\theta=0,8$  (ileri) yükünde daha da azalarak, akımın 3,5 pu değerinde, çıkış gücü maksimum 3,5 pu değerine ulaşmaktadır.



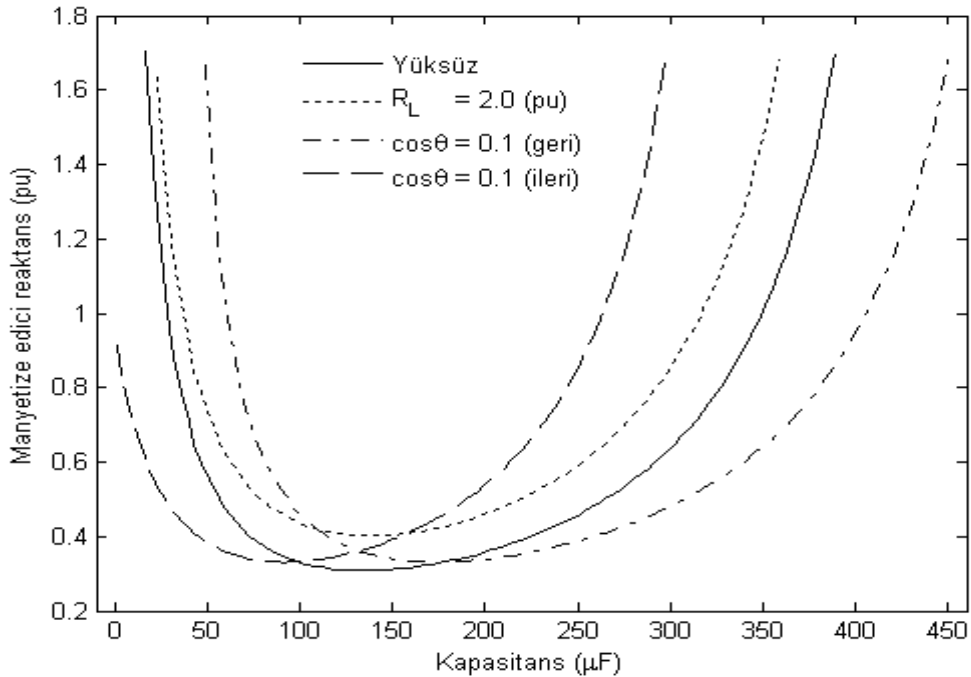
Şekil 4.29 Üç Ayrı Kapasitif Yükte  $I_L$ 'nin Değişmesine Karşılık  $P_C$ ' nin Değişimi

#### 4.4. FARKLI YÜKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde rezistif, endüktif ve kapasitif yüklerde, aynı büyüklüklerin kapasitördeki değişmelere karşılık değişimleri aynı grafik üzerinde çizilerek karşılaştırma olanağı sağlanmıştır.

Şekil 4.30' da  $v = 1$  pu sabit hızda generatörün  $R_L = 2$  pu rezistif,  $\cos \theta = 0,1$  endüktif ve  $\cos \theta = 0,1$  kapasitif yüklerde uyartım kapasitörünün kapasitesindeki değişmeye karşılık manyetize edici reaktanstaki değişme görülmektedir. Yüksüz durum sürekli çizgi, rezistif yüklü durum nokta, endüktif yüklü durum noktali çizgi ve kapasitif yüklü durum da kesik çizgi ile belirtilmiştir.

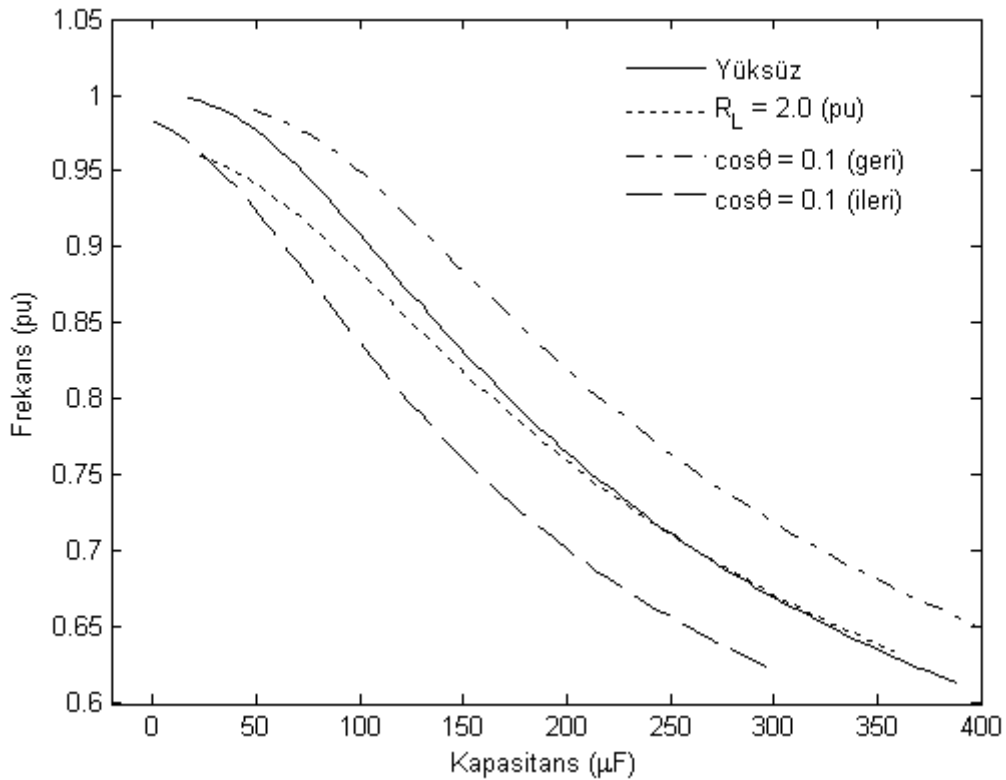
Bütün yüklerde manyetize edici reaktansın bir minimum değeri vardır. Bu minimum değer yüksüz ve rezistif yüklü durum için aynı kapasite değerinde gerçekleşmesine karşılık, yüksüz durumda  $X_M$  daha küçük seviyeye ulaşmıştır. Noktali çizgi ile gösterilen endüktif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sağ tarafa kaymış ve böylece  $X_M$ ' yi minimum yapan kapasite değeri de artmıştır. Kesik çizgi ile gösterilen kapasitif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sol tarafa kaymış ve böylece  $X_M$ ' yi minimum yapan kapasite değeri de azalmıştır.



Şekil 4.30 Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $X_M$ ' nin Değişimi

Şekil 4.31' de  $v = 1$  pu sabit hızda generatörün  $R_L=2$  pu rezistif,  $\cos \theta=0,1$  endüktif ve  $\cos \theta=0,1$  kapasitif yüklerde uyartım kapasitörünün kapasitesindeki değişmeye karşılık generatör frekansındaki değişme görülmektedir. Yüksüz durum sürekli çizgi, rezistif yüklü durum nokta, endüktif yüklü durum noktalı çizgi ve kapasitif yüklü durum da kesik çizgi ile belirtilmiştir.

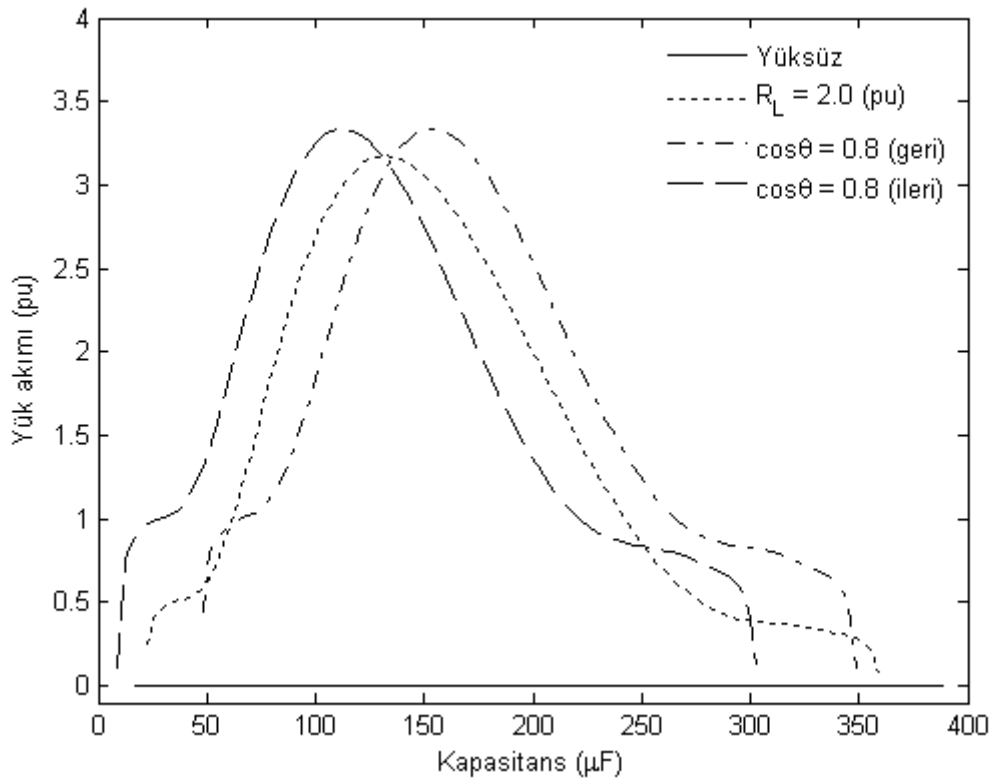
Bütün yüklerde generatör frekansı uyartım kapasitörünün en küçük değerinde 1 pu değerine yakın ve kapasitör değeri arttıkça frekansın da ulaştığı bir minimum değer vardır. Nokta ile gösterilen rezistif yüklü durumda grafik yüksüz durum ile aynı ekseninde gerçekleşmiş ve böylece  $f'$  yi maksimum yapan kapasite değeri de aynı olmuştur fakat  $f'$  nin ulaştığı maksimum seviye 0,95 pu değerine düşmüştür. Noktalı çizgi ile gösterilen endüktif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sağ tarafa kaymış ve böylece  $f'$  yi maksimum yapan kapasite değeri de artmıştır. Kesik çizgi ile gösterilen kapasitif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sol tarafa kaymış ve böylece  $f'$  yi maksimum yapan kapasite değeri de azalmıştır.



Şekil 4.31 Üç Farklı Yükte Kapasitanstaki Değişmeye Karşılık  $f'$  nin Değişimi

Şekil 4.32' de  $v = 1$  pu sabit hızda generatörün  $R_L=2$  pu rezistif,  $\cos \theta=0,8$  endüktif ve  $\cos \theta=0,8$  kapasitif yüklerde uyartım kapasitörünün kapasitesindeki değişmeye karşılık generatör frekansındaki değişme görülmektedir. Yüksüz durum sürekli çizgi, rezistif yüklü durum nokta, endüktif yüklü durum noktalı çizgi ve kapasitif yüklü durum da kesik çizgi ile belirtilmiştir.

Bütün yüklerde yük akımının bir maksimum değeri vardır. Bu maksimum değer bütün yük çeşitlerinde farklı kapasitans değerinde oluşmuştur. Nokta ile gösterilen rezistif yüklü duruma ait grafik ortada görülmektedir. Noktalı çizgi ile gösterilen endüktif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sağ tarafa kaymış ve böylece  $I_L'$  yi maksimum yapan kapasite değeri de artmıştır. Kesik çizgi ile gösterilen kapasitif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sol tarafa kaymış ve böylece  $I_L'$  yi maksimum yapan kapasite değeri de azalmıştır.

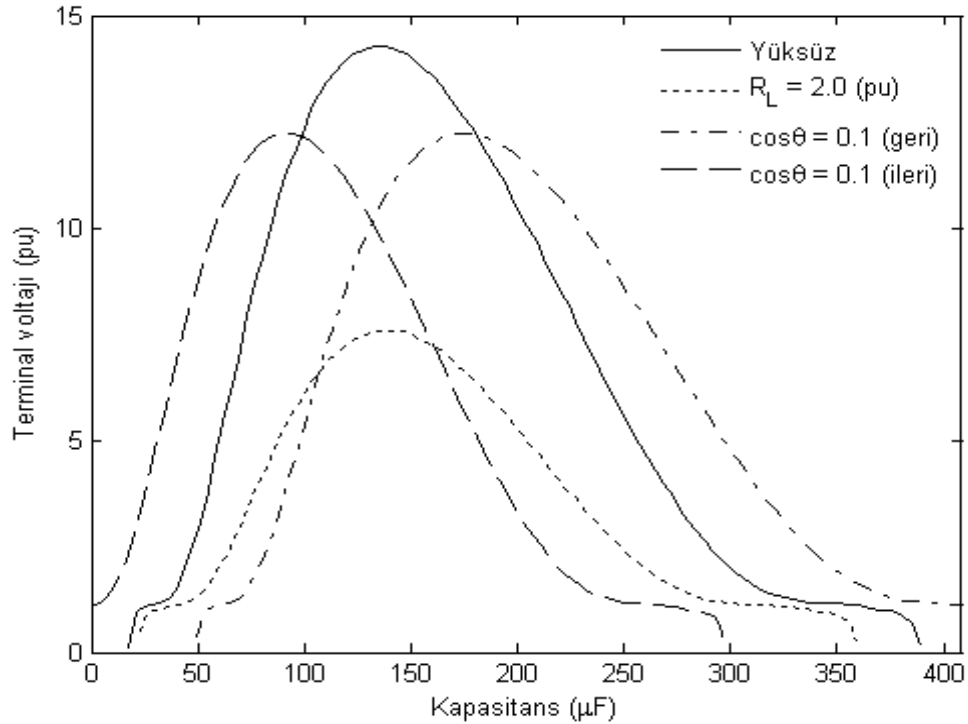


Şekil 4.32 Üç Farklı Yükte Kapasitördeki Değişmeye Karşılık  $I_L'$  nin Değişimi

Şekil 4.33' de  $v = 1$  pu sabit hızda generatörün  $R_L=2$  pu rezistif,  $\cos \theta=0,1$  endüktif ve  $\cos \theta=0,1$  kapasitif yüklerde uyartım kapasitörünün kapasitesindeki değişmeye karşılık generatör frekansındaki değişme görülmektedir. Yüksüz durum sürekli çizgi, rezistif yüklü durum nokta, endüktif yüklü durum noktalı çizgi ve kapasitif yüklü durum da kesik çizgi ile belirtilmiştir.

Bütün yüklerde terminal voltajının bir maksimum değeri vardır. Bu maksimum değer yüksüz ve rezistif yüklü durum için aynı kapasite değerinde gerçekleşmesine karşılık, yüksüz durumda  $V_T$  daha küçük seviyeye ulaşmıştır. Noktalı çizgi ile gösterilen endüktif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sağ tarafa kaymış ve böylece  $V_T$ ' yi maksimum yapan kapasite değeri de artmıştır. Kesik çizgi ile gösterilen kapasitif yüklü durumda grafik yatay ekseninde sol tarafa kaymış ve böylece  $V_T$ ' yi maksimum yapan kapasite değeri de azalmıştır.

Buradan, bütün yüklerde bir terminal voltajı elde etmek için minimum ve maksimum kapasitör değerine ihtiyaç duyulduğu ve  $V_T$ ' yi maksimum yapmak için endüktif yüklerde daha çok, kapasitif yüklerde de daha az kapasiteye ihtiyaç duyulduğu sonucunu çıkarabiliriz.



Şekil 4.33 Üç Farklı Yükte Kapasitördeki Değişmeye Karşılık  $V_T$ ' nin Değişimi

## 5. SONUÇLAR

Asenkron generatörün uyarıtımını bir minimum ve maksimum kapasitans aralığında gerçekleştirmektedir. Bu aralık dışında yer alan kapasite değerlerinde uyarıtım olmamaktadır. Bu kapasite stator sargı uçlarına bağlandığında ve diğer şartlar da yerine getirildiğinde, uyarıtım aralığında asenkron makina generatör gibi çalışarak anma geriliminde elektrik enerjisi üretmektedir. Üretilen enerji sinüsoidal alternatif akım olup senkron devirde frekansı 50 Hz' dir.

Generatör yüksüz iken uyarıtım aralığı en büyük olmuş, yük arttıkça bu uyarıtım aralığının daraldığı gözlemlenmiştir. Aynı işlem rezistif, endüktif ve kapasitif yükler için tekrarlandığında; ilgili yükler için bu aralığın değişmediği fakat endüktif yüklerde daha kapasitans miktarının artırıcı yönde, kapasitif yüklerde ise azaltıcı yönde grafiklerde bir kayma gözlemlenmiştir.

Hava aralığındaki ve terminal uçlarındaki voltaj küçük bir değer farkıyla benzer değişim göstermektedir. Bir minimum ve maksimum kapasitans aralığında gerçekleşen voltaj generatör yüksüz iken en büyük olmakta, generatör yüklendikçe üretilen voltaj azalmakta ve bir değerden sonra generatör hava aralığında ve terminal uçlarında voltaj üretmemektedir. Voltaj düşey, kapasitans yatay ekseninde gösterilerek çizilen grafikte endüktif yüklerde grafik yatay ekseninde sağ tarafa, kapasitif yüklerde sol tarafa kaymıştır. Başka bir deyişle endüktif yüklerde uyarıtım için gerekli kapasitans ihtiyacında artma, kapasitif yüklerde de azalma gözlemlenmiştir.

Generatörde üretilen elektriğin enerjisinin frekansı, generatör yüksüz iken uyarıtım için minimum kapasitans değerinde 1 pu değerinde iken kapasitans değeri maksimum değerinde kadar artırıldığında yaklaşık 0,65 pu değerlerine kadar azalmaktadır. Frekanstaki bu azalma artan yüklerde frekansın daha düşük değerlerinden başlayarak yine 0,65 pu değerine kadar azalmaktadır. Endüktif yüklerde frekanstaki değişim benzer şekilde fakat daha büyük değerli kapasitans aralığında, kapasitif yüklerde de olaylar daha küçük değerli kapasitans aralığında gerçekleşmektedir.

Generatörün uyartım aralığında çıkışından alınan güç voltaj ve yük akımına benzer bir değişim göstermektedir. Yük direncinin büyük olduğu durumlarda maksimum çıkış gücü elde edilmiş, yük direnci azaltıldıkça, başka bir deyişle yük akımı artırıldıkça çıkış gücü azalmaktadır. Endüktif ve kapasitif yüklerde de RL ve RC yüklerinin miktarına bağlı olarak yük arttıkça çıkış gücü azalmaktadır. Çıkış gücünün elde edildiği aralık, endüktif yüklerde büyük kapasite değerlerinde, kapasitif yüklerde ise küçük kapasite değerlerinde gerçekleşmektedir.

Generatörün en verimli çalıştığı durum uyartımın gerçekleştiği minimum kapasitans değeri ve yük akımının büyük olduğu durumdur. Fakat kapasitans değeri artırıldıkça generatör verimi azalmaktadır. Generatör yükü artırılıp, kapasitör değeri uyartım aralığında maksimum değerine doğru artırıldığında verimde daha fazla azalma gözlemlenmektedir.

Maksimum ve minimum kapasite değerleri arasında seçilen özel bir değerde rezonans oluşmaktadır ki bu rezonans koşullarında  $I_L$ ,  $V_T$ ,  $V_G/F$ ,  $P_C$ ,  $P_G$  en büyük değerlerine ulaşmaktadır. Seçilen özel kapasite değerinde generatör yüksüz iken terminal gerilimi en büyük değerine ulaşmakta, yük artırıldıkça terminal gerilimi ve diğer parametrelerin azaldığı gözlenmektedir.

Şebekeden uzak müstakil çalışan sistemlerde seçilen bir tek uygun kapasitör ile uyartılan generatör kullanılabilir. Fakat üretilen enerjinin hıza bağlı olarak frekansı, yüke bağlı olarak da terminal voltajı değişim gösterir. Bu haliyle rezistif yüklerde veya doğrultma ve şarj sistemleri ile birlikte kullanılabilir.

Sabit frekans ve sabit terminal voltajı istenen yerlerde hızı sabitleyici ve gerilimi sabitleyici düzenekler geliştirilmelidir.

Frekansı sabitlemek için hız sabitlenmeli, bunun için de rüzgâr hızına göre kanat açılarını ve dişli devir oranı bir kontrol sistemi ile ayarlanabilir.

Voltajı sabit tutmak için değişen yük koşullarında devreye kapasitör ilave edecek yada çıkaracak bir kontrol stratejisi geliştirilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] HAYLI, S., 2001, Rüzgâr Enerjisinin Önemi Dünyada ve Türkiye'deki Durumu, F.Ü. Sosyal Bilimler Dergisi, C 11, Sayı 1, Sayfa 1-26.
- [2] TAŞGETİREN, S., 1998, Rüzgâr Enerjisi, Ekoloji Dergisi, C 8, Sayı 29, Sayfa 25-29.
- [3] KARABULUT, Y., 1999, Enerji Kaynakları, Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara.
- [4] ANDERSEN, D.P., 2007, Review of Historical and Modern Utilization of Wind Power, *RISQ*, Technical University of Denmark, <http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/dannemand.htm> (1 of 19)01-07-2007 17:44:48.
- [5] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, England, ISBN 0 471 48997 2.
- [6] GOLDING, E.W., 1955, *The Generation of Electricity by Wind Power*, P.318, London
- [7] Türkiye Rüzgâr Atlası, <http://www.dmi.gov.tr> [Erişim Tarihi: 5 Nisan 2010].
- [8] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, Kanun No: 5346, Kabul Tarihi: 10.05.2005.
- [9] VADHERA, S., SANDHU, K.S., 2008, Constant Voltage Operation of Self Excited Induction Generator Using Optimization Tools, *International Journal of Energy and Environment*, Issue 4, Volume 2.
- [10] MALIK, N.H., MAZI, A.A., 1987, Capacitance Requirements for Isolated Self-Excited Induction Generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No. 1.
- [11] MALIK, N.H., AL-BAHRANI, A.H., 1990, Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of a Self-Excited Induction Generator, *IEE Proceedings*, Vol. 137. Pt. C, No. 2.
- [12] AKPINAR, E., 2003, PWM Çevirgeç Denetimli Asenkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi Tasarımı, PROJE NO: 101E004, İzmir.
- [13] ALGHUWAINEM, S.M., 1999, Steady-State Analysis of a Self-Excited Induction Generator Including Transformer Saturation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3.
- [14] SARIOĞLU, M.K., GÖKAŞAN, M., BOĞOSYAN, S., *Asenkron Makinalar ve Kontrolü*, BİRSEN yayınevi, İstanbul.
- [15] CHAN, T.F., 1992, Capacitance Requirements of Self-Excited Induction Generators, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, pp. 304-310.

- [16] ALDEMİR, R., Kapasitör Uyarmalı Asenkron Generatörler, *Elektrik Mühendisliği*, 346.
- [17] JOSHI, D., SANDHU, K.S., SONI, M.K., 2009, Voltage Control of Self-Excited Induction Generator Using Genetic Algorithm, *TUBITAK Turkish Journal Electric Engineering & Comp. Sci*, Vol.17, No.1.
- [18] AL-SAFFAR, M.A., NHO, E.C., LIPO, T.A., 1998, Controlled Shunt Capacitor Self-Excited Induction Generator, *IEEE*, 0-7803-4943-1/98.
- [19] HAQUE, M.H., 2009, Selection of Capacitors to Regulate Voltage of a Short-Shunt Induction Generator, *IET Generation Transmission & Distribution*, Vol 3, Iss 3, pp 257-265.
- [20] MATHEW, S., *Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-10 3-540-30905-5.
- [21] Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini, <http://tr.wikipedia.org> [Erişim Tarihi: 6 Nisan 2010].
- [22] Savonius Rotorlu Rüzgâr Türbini, <http://tr.wikipedia.org> [Erişim Tarihi: 6 Nisan 2010].
- [23] DURSUN, E., BİNARK, A.K., 2008, Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, UTES 2008, 17-19 Aralık İstanbul.
- [24] PEŞİNT. M.A., ve ATEŞ. M.H., 1990, *Elektrik Makinalarının Esasları*, Gazi Üniversitesi Yayın No 144, S. 740, Ankara, 975-507-021-4.
- [25] ANAGRAH, Y.N., AL-REFAE, I.M., 2003, Teaching the Self-Excited Induction Generator Using Matlab, *International Journal of Electrical Engineering Education*, V 40, Iss 1, PP 55-65, Manchester University Press.
- [26] MURTHY. S.S., CHATURVEDI. R., 1989, Use of Conventional Motor as a Wind Driven Self Excited Induction Generator for Autonomous Operation, *IEEE*, CH 2781-3/89/000002051.
- [27] ALOLAH, A.L., 2000, Optimization-Based Steady State Analysis of Three Phase Self-Excited Induction Generator, *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 15, No 1.
- [28] HEPERKAN, H., KESGİN, U., 2006, *Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler (Dördüncü basımdan çeviri)*, Literatür, İstanbul, 975-8431-83-8.
- [29] ARİFOĞLU, U., 2005, *MATLAB 7.04 SIMULINK ve Mühendislik Uygulamaları*, Alfa, İstanbul, 975-297-674-3.

- [30] TUTKUN, N., ZKÜ FBE EEM ABD., Genetik Optimizasyon Dersi, Ders Notu, 2008.
- [31] TUTKUN, N., ARSLAN, F., 2010, Determination of Capacitance Range in the Self Excited Induction Generator Through the Hybrid Genetic Algorithms, *Speedam 2010*, June 14- June 16, Pisa Italy.

## **EKLER**

Bu araştırmada üç fazlı yıldız bağlı, 0,75kW, 220V, 3,63A, 50Hz, 1400 rpm ve parametreleri  $R_S=0,098414$  pu,  $R_R=0,070064$  pu,  $X_S=0,098414$  pu,  $X_R=0,098414$  pu, olan asenkron makina kullanılmıştır. Makina, tipik bir DC motor ile 1500 rpm veya  $v=1$  pu senkron hızda döndürölmüştür.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : ARSLAN, Fevzi  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 04.09.1969 KARABÜK  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (370) 447 61 11  
e-mail : fevziarslan@yahoo.com

### **Eğitim**

<b>Derece</b>	<b>Eğitim Birimi</b>	<b>Mezuniyet tarihi</b>
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik Eğitimi Bölümü	1991
Lise	Karabük Endüstri Meslek Lisesi	1986

### **İş Deneyimi**

<b>Yıl</b>	<b>Yer</b>	<b>Görev</b>
1991-1996	AYDIN A.T. ve T.Lisesi	Teknik Öğretmen
1996-	BARTIN/Ulus T. ve E.M.Lisesi	Teknik Öğretmen

### **Yabancı Dil**

İngilizce

### **Yayınlar**

1. Tutkun, N., Arslan, F., 2010: *Determination of capacitance range in the self-excited induction generator through the hybrid genetic algorithms*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Speedam 2010, Pisa, Italy.

### **Hobiler**

Masa tenisi, Bilgisayar teknolojileri, Kitap okuma.