

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KONTROL
YÖNTEMLERİ**

MERTCAN ATALAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNELERİ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ERKAN MEŞE**

İSTANBUL, 2011

ÖNSÖZ

Son yıllarda, CO2 salımı ve küresel ısınmaya karşı duyarlılık her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucu olarak tüm dünya ülkeleri, enerji politikalarını sürdürülebilir ve temiz kaynakların kullanılmasına yönelik revize etmektedirler. Son on yıldaki gelişmesinden de anlaşılacağı üzere en büyük talebi rüzgâr enerjisi görmüştür. Gelişen güç elektroniği teknolojisinin avantajlarını da bünyesine katarak rüzgâr enerjisi, önümüzdeki yıllarda da cazibesini sürdürecektir.

Bu çalışma kapsamında, rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleri, kontrol yöntemleri ve üç ayrı sistemin arıza dayanımları incelenmiştir. İncelenen sistem, 1,5 MVA nominal gücünde ve şebekeye bağlı bir tasarımdır. Başlıca bileşenleri; rüzgâr türbini, KMSG, AC/DC dönüştürücü, DC bara, DC/AC dönüştürücü, filtre endüktansı, opsiyonel transformatör, çeşitli sensörler ve koruma ekipmanlarından oluşmaktadır.

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Erkan MEŞE'ye, yardım ve anlayışları için Arş Gör. Evren İŞEN'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca bana verdikleri destek için Dr. S. Dicle GÖRKEM'e, sadık dostumuz Köpük GÖRKEM'e, Endüstriyel Enerji San. ve Tic. Ltd. Şti. ailesine ve üzerimde büyük emek sahibi olan aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ağustos, 2011

Mertcan ATALAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Rüzgâr Enerjisinin Gelişimi.....	1
BÖLÜM 2	
RÜZGÂR GÜCÜ ANALİTİK MODELİ	4
1.2 İdeal Bir Türbinde Rüzgâr Gücü	4
BÖLÜM 3	
RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖR KONTROLÜNDE TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAMALAR.....	7
3.1 Uzay Vektör Kavramı	7
3.1.1 Clarke Dönüşümü	8
3.1.2 Park Dönüşümü.....	9
3.2 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM).....	10
3.3 Histerezis Akım Kontrolü (HAK).....	11
3.4 Uzay Vektör Modülasyonu (UVM).....	12
3.4.1 V_α , V_β , V_{ref} ve θ değerlerinin belirlenmesi.....	16
3.4.2 T_1 , T_2 , T_3 değerlerinin belirlenmesi	17

3.5	Uzay Vektör Modülasyonu ve Darbe Genişlik Modülasyonu Karşılaştırması	19
3.6	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG).....	19
3.6.1	Dahili Manyetikli KMSG	20
3.6.2	Yüzey Montajlı KMSG.....	20
3.6.3	Matematiksel Tanımlamalar	20
3.6.3.1	dq -ekseni Gerilim Eşitlikleri	20
3.6.3.2	dq -ekseni Akı Eşitlikleri	21
3.6.3.3	Moment Eşitliği.....	21
3.6.3.4	Güç Eşitlikleri	22
3.6.3.5	Makinenin Genel Hareket Eşitliği.....	22
BÖLÜM 4		
	RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖRLERİNİN MODERN KONTROLÜ	23
4.1	KMSG Kontrolü	23
4.1.1	Alan Yönlendirmeli Kontrol.....	23
4.2	İnverter(DC-AC Dönüştürücü) Kontrol Stratejileri.....	26
BÖLÜM 5		
	1,5 MVA GÜCÜNDE BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN ELEKTRİKSEL GÜÇ KATI TASARIMI	30
5.1	Giriş	30
5.2	Sistem Tanımı ve Ana Bileşenler	30
5.3	Tasarım Yaklaşımı	31
5.4	Dönüştürücü Topolojisinde Göz Önüne Alınması Gerekenler.....	31
5.5	Şebeke ve Generatör Gerilim Seviyeleri	32
5.6	Güç Kontrolünde Göz Önünde Bulundurulması Gerekenler.....	33
5.7	Tasarım Optimizasyon Süreci.....	34
5.7.1	Adım 1	34
5.7.2	Adım 2	34
5.7.3	Adım 3	34
5.7.4	Adım 4	35
5.7.5	Adım 5	35
5.7.6	Adım 6	35
5.7.7	Adım 7	35
5.8	Simülasyon Sonuçları	35
5.8.1	Sistem 1.....	36
5.8.2	Sistem 2.....	46
5.8.3	Sistem 3.....	55
5.8.4	Sistemlerin THD Karşılaştırmaları	65
5.8.5	Sistemlerin Kısa Devre Duyarlılıkları	71
5.8.6	Güç Elektroniği Elemanlarının Seçimi	77
5.8.7	Maliyet Hesabı	80
BÖLÜM 6		
	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
	KAYNAKLAR	83

EK-A

MATLAB/SIMULINK MODELLERİ	85
A-1 Genel Sistem Modeli	85
A-2 Doğrultucu HAK Bloğu	86
A-3 İnverter HAK Bloğu	87
A-4 İnverter UVM Bloğu	88
A-5 İnverter UVM Kontrol Bloğu	89
A-6 İnverter UVM Modülasyon Bloğu	90
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGE LİSTESİ

A	Rüzgâr paketi kesit alanı
B	Viskoz sürtünmesi
i_a	A fazı anlık stator akımı
i_b	B fazı anlık stator akımı
i_c	C fazı anlık stator akımı
J	Atalet momenti
L_d	d -ekseni endüktansı
L_q	q -ekseni endüktansı
m	Rüzgâr kütlesi
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
x	Rüzgar doğrultusu
x_d	Endüktans
v	Rüzgar hızı
ρ	Hava yoğunluğu
T_e	Elektro manyetik moment
T_L	Yük momenti
T_d	Sürtünme momenti
ζ	Çıkıklık oranı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
GSO	Güç Sistemi Operatörleri
HAK	Histerisiz Akım Kontrolü
KMSG	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
PWM	Pulse Width Modulation
UVM	Uzay Vektör Modülasyonu
THD	Total Harmonic Distortion

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Dünyada toplam kurulu rüzgâr gücü – World Wind Energy Association 2009 Raporu.....	1
Şekil 1.2 Değişik rüzgâr hızlarında değişken hızlı ve sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin çalışma noktaları.....	2
Şekil 1.3 2 MW değişken hızlı rüzgar türbininin maliyet dağılımı – Bernstein Research, 2007.....	3
Şekil 2.1 v hızı ile hareket eden rüzgar paketi.....	4
Şekil 2.2 Rüzgar türbininden geçen havanın oluşturduğu kanal.....	5
Şekil 3.1 abc ekseninde stator uzay vektörü ve bileşenleri.....	7
Şekil 3.2 $\alpha\beta$ ekseninde stator uzay vektörü ve bileşenleri.....	8
Şekil 3.3 $\alpha\beta$ ve dq ekseninde stator akım vektörü ve bileşenleri.....	9
Şekil 3.4 Tek fazlı inverter.....	10
Şekil 3.5 Temel PWM uygulaması.....	10
Şekil 3.6 HAK yönteminde PWM sinyali.....	11
Şekil 3.7 Üç fazlı inverter topolojisi.....	12
Şekil 3.8 Gerilim uzay vektörleri.....	14
Şekil 3.9 abc ve $\alpha\beta$ eksenlerinde gerilim uzay vektörleri.....	15
Şekil 3.10 Uzay vektörleri.....	16
Şekil 3.11 1. sektörde referans vektörün komşu vektörler cinsinden gösterimi.....	18
Şekil 3.10 PWM ve UVM teknikleri karşılaştırması.....	19
Şekil 4.1 Genel sistem diyagramı.....	26
Şekil 4.2 UVM tekniğinde kontrol döngüleri.....	27
Şekil 4.3 HAK tekniğinde kontrol döngüleri.....	28
Şekil 5.1 Genel sistem diyagramı.....	31
Şekil 5.2 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü.....	36
Şekil 5.3 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde V_β referans vektörü.....	37
Şekil 5.4 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni.....	37
Şekil 5.5 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni.....	38
Şekil 5.6 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi.....	38
Şekil 5.7 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde aktif güç.....	39
Şekil 5.8 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde reaktif güç.....	39
Şekil 5.9 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni.....	40
Şekil 5.10 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni.....	40
Şekil 5.11 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi.....	41
Şekil 5.12 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde aktif güç.....	41

Şekil 5.13	Sistem 1 HAK kontrollü inverterde reaktif güç	42
Şekil 5.14	Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni	42
Şekil 5.15	Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni	43
Şekil 5.16	Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları.....	43
Şekil 5.17	Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik moment..	44
Şekil 5.18	Sistem 1 DC bara gerilimi.....	44
Şekil 5.19	Sistem 1 DC bara ripple akımı.....	45
Şekil 5.20	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü	46
Şekil 5.21	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde V_β referans vektörü	47
Şekil 5.22	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akım ve gerilimi	47
Şekil 5.23	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde aktif güç	48
Şekil 5.24	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde reaktif güç	48
Şekil 5.25	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni.....	49
Şekil 5.26	Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni.....	49
Şekil 5.27	Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni	50
Şekil 5.28	Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni	50
Şekil 5.29	Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akım ve gerilimi.....	51
Şekil 5.30	Sistem 2 HAK kontrollü inverterde aktif güç	51
Şekil 5.31	Sistem 2 HAK kontrollü inverterde reaktif güç	52
Şekil 5.32	Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni	52
Şekil 5.33	Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni	53
Şekil 5.34	Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları.....	53
Şekil 5.35	Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik moment..	54
Şekil 5.36	Sistem 2 DC bara gerilimi.....	54
Şekil 5.37	Sistem 2 DC bara ripple akımı.....	55
Şekil 5.38	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü	55
Şekil 5.39	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde V_β referans vektörü	56
Şekil 5.40	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni.....	56
Şekil 5.41	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni.....	57
Şekil 5.42	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi	57
Şekil 5.43	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde aktif güç	58
Şekil 5.44	Sistem 3 UVM kontrollü inverterde reaktif güç	58
Şekil 5.45	Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı aktif bileşeni	59
Şekil 5.46	Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı reaktif bileşeni	59
Şekil 5.47	Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı ve gerilimi	60
Şekil 5.48	Sistem 3 HAK kontrollü inverterde aktif güç	60
Şekil 5.49	Sistem 3 HAK kontrollü inverterde reaktif güç	61
Şekil 5.50	Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni	61
Şekil 5.51	Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni	62
Şekil 5.52	Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları.....	62
Şekil 5.53	Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik momenti	63
Şekil 5.54	Sistem 3 DC bara gerilimi.....	63
Şekil 5.55	Sistem 3 DC bara ripple akımı.....	64
Şekil 5.56	Sistem 1 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	65
Şekil 5.57	Sistem 1 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	66
Şekil 5.58	Sistem 2 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	67

Şekil 5.59	Sistem 2 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	68
Şekil 5.60	Sistem 3 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	69
Şekil 5.61	Sistem 3 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu	70
Şekil 5.62	Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı	71
Şekil 5.63	Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı	72
Şekil 5.64	Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı	72
Şekil 5.65	Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı	73
Şekil 5.66	Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı	73
Şekil 5.67	Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı	74
Şekil 5.68	Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı	74
Şekil 5.69	Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı	75
Şekil 5.70	Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı	75
Şekil 5.71	Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı	76
Şekil 5.72	Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı	76
Şekil 5.73	Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı	77

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Şebeke tarafındaki güç elektroniği dönüştürücüsü	78
Çizelge 5. 2 Generatör tarafındaki güç elektroniği dönüştürücüsü	78
Çizelge 5. 3 DC bara	79
Çizelge 5. 4 Endüktans değerleri.....	79
Çizelge 5. 5 Maliyet Tablosu	80

RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KONTROL YÖNTEMLERİ

Mertcan ATALAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkan MEŞE

Son yıllarda, CO₂ salımı ve küresel ısınmaya karşı duyarlılık her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucu olarak tüm dünya ülkeleri, enerji politikalarını sürdürülebilir ve temiz kaynakların kullanılmasına yönelik revize etmektedirler. Son on yıldaki gelişmesinden de anlaşılacağı üzere en büyük talebi rüzgâr enerjisi görmüştür. Gelişen güç elektroniği teknolojisinin avantajlarını da bünyesine katarak rüzgâr enerjisi, önümüzdeki yıllarda da cazibesini sürdürecektir.

Bu çalışma kapsamında, rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleri ve kontrol yöntemleri incelenmiştir. Sistem, 1,5 MVA nominal gücünde ve şebekeye bağlı bir tasarımdır. Başlıca bileşenleri; rüzgâr türbini, KMSG, AC/DC dönüştürücü, DC bara, DC/AC dönüştürücü, filtre endüktansı, opsiyonel transformatör, çeşitli sensörler ve koruma ekipmanlarından oluşmaktadır.

Tüm sistem Matlab/SIMULINK ortamında modellenmiştir. Simülasyonlar, 480V, 600V ve 2400V fazlar arası gerilim değerleri için üç farklı topolojide tasarlanmıştır. Sistem boyutlarına simülasyonlar sonucunda karar verilmiş ve değişik topolojilerin davranışları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: rüzgâr enerjisi, KMSG, güç elektroniği, uzay vektör modülasyonu, histerisiz akım kontrolü

ABSTRACT

POWER CONTROL TECHNIQUES OF THE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

Mertcan ATALAN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Erkan MEŞE

In the last decade, by getting more sensitive to CO₂ emission and global warming, all the developed and developing countries around the world are revising their energy policies by making room for sustainable and clean energy sources in it. With the increasing trend of wind energy, it can be easily seen that the most preferred clean energy source is wind. Furthermore, it is quite obvious that wind energy will maintain its vantage by incorporating power electronics technologies.

In an effort to give an insight about the process with some critical steps and related iterations, this study aims to present the considerations that should be taken into account in the design of a 1.5 MVA wind power generation plant and its utility interface. The system consists of wind turbine, surface mounted permanent magnet synchronous generator(PMSG), AC/DC converter, DC link, DC/AC converter, transformer, inductor, various sensors and protection equipments.

Entire system is implemented in Matlab/SIMULINK. Three options for utility voltage level are specified at the beginning of the investigation and these are 480V, 600V and 2400V line to line voltages. These levels dictate the voltage levels for the rest of the system. Comparisons are made to observe the impact of grid voltage level on the system cost and performance.

Key words: Wind energy, PMSG, power electronics, space vector modulation, hysteresis current control

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Rüzgâr Enerjisinin Gelişimi

Günümüzde, CO₂ emisyonu ve küresel ısınmaya olan katkıları konusunda artan bilinçlenme temiz ve sürdürülebilir enerji alanında ciddi bir talep oluşturmaktadır. Bu enerji alanlarına rüzgâr, deniz, güneş ve biokütle örnekleri verilebilir. Rüzgâr enerjisi ise en büyük genişlemeyi son on yıl içerisinde göstermiştir. Bunun en önemli nedenleri ise çevreyi kirletmemesi, sıfır CO₂ emisyonu ile çalışması ve sektördeki rekabetin oluşturduğu düşük maliyetler olarak sayılabilir. (Şekil 1.1)'de, 2001 ve 2009 yılları arasındaki 134.891 MW'lık kurulu güç artışı ve 2010 beklentisi görülmektedir.

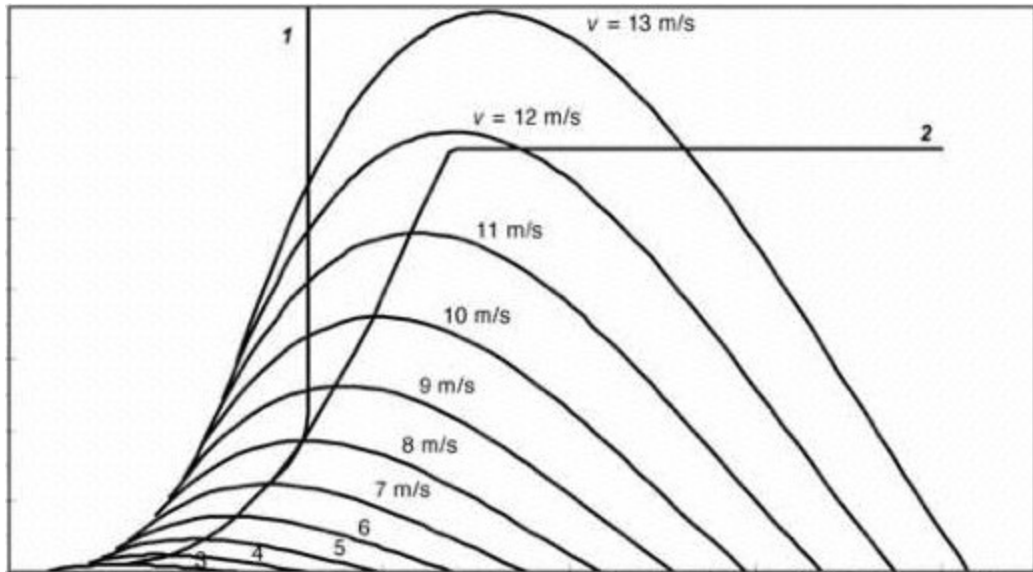


Şekil 1.1 Dünyada toplam kurulu rüzgâr gücü – World Wind Energy Association 2009 Raporu

Bu gelişme ile birlikte rüzgâr türbinlerinin boyutları da artmıştır. 1990 yıllarında 300 KW olan türbin kapasitesi günümüzde 5 MW kapasitesine kadar çıkmıştır. Bu noktada en büyük güçlük rüzgâr hızının rastlantısal olması ve bundan maksimum enerjinin nasıl elde edileceğidir.

Rüzgâr türbinlerinde generatör noktasında, sabit ve değişken hızlı olmak üzere iki çalışma şekli vardır. Rüzgâr enerji sistemlerinin önceki dönemlerinde yaygın bir şekilde asenkron generatörler kullanılarak sabit hızlı sistemler uygulanıyordu. Sabit hızlı sistemlerin bazı dezavantajları, düşük verimlilik, düşük güç kalitesi, yüksek mekanik stres ve en önemlisi maksimum güç üretiminin sadece sabit bir rüzgâr hızında gerçekleştirebiliyor olması sayılabilir.

Son yıllarda güç elektroniği teknolojisinin gelişmesi ve buna bağlı olarak maliyetlerin azalması ile değişken hızlı rüzgâr türbinleri cazip bir hal almıştır. Rüzgâr türbinleri değişken frekans kontrolü sayesinde düşük ve orta seviyedeki rüzgâr hızlarında maksimum güç elde etme yeteneği kazanmıştır. (Şekil 1.2)'de görüldüğü gibi yüksek rüzgâr hızlarında rotor gücü sınırlanmalıdır.

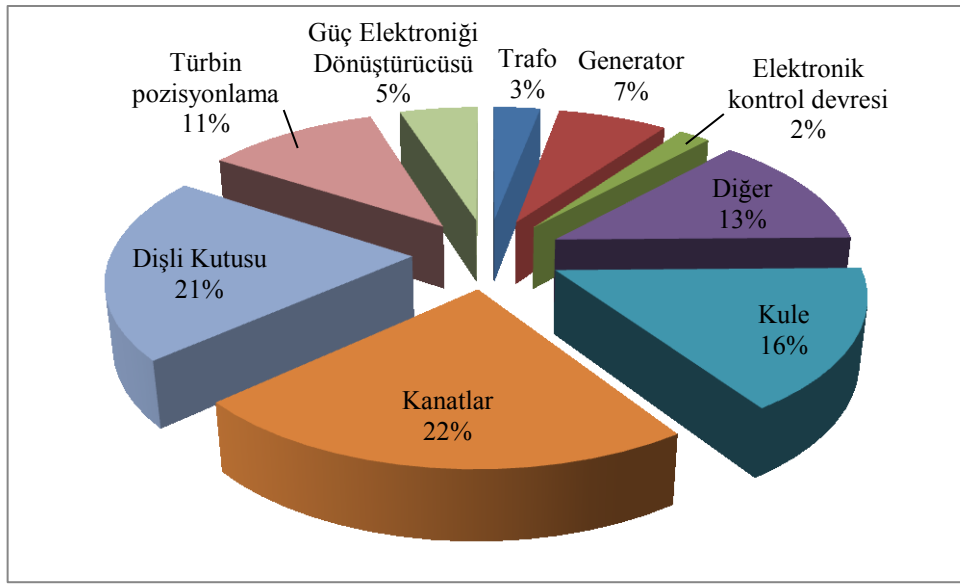


Şekil 1.2 Değişik rüzgâr hızlarında değişken hızlı ve sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin çalışma noktaları.

Geçmişte kullanılan değişken hızlı türbin sistemlerinde genellikle kısmi ölçekli dönüştürücü topolojisi ile kontrol edilen çift beslemeli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Ancak günümüzde tam ölçekli dönüştürücü kontrollü kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG) kullanımı pazar payını oldukça arttırmıştır. Asenkron generatör ile karşılaştırıldığında KMSG daha verimli, boyut olarak daha küçük ve

kontrol edilmesi daha kolaydır. Bunların ışığında KMSG topolojili rüzgâr türbinleri diğer değişken hızlı muadillerine göre daha verimlidirler. Ancak KMSG, kalıcı mıknatısların yüksek maliyeti ve her çalışma koşulunda sabit uyardırmaya sahip olması gibi dezavantajları bünyesinde bulundurmaktadır [1].

KMSG değişken hızlarda çalışabilmektedir, bu nedenle maksimum güç, KMSG kullanan bir rüzgâr türbini sisteminde rahatlıkla elde edilebilir. Genellikle, rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler yüksek hızlarda çalışmaktadır ve bu nedenle rüzgâr türbininin şaftındaki hız bir dişli kutusu ile yükseltilerek generatörün nominal hızına yaklaştırılır. Ancak, çok kutuplu KMSG ve tam ölçekli dönüştürücü topolojisi ile tasarımı edilen rüzgâr türbinleri düşük hızlarda çalışabilmekte ve dişli kutusunu gereksiz kılmaktadır. Doğrudan tahrik uygulamalar çoğunlukla tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebepleri, toplam boyuttaki azalma, düşük kurulum ve bakım maliyeti olarak sayılabilir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 2 MW değişken hızlı rüzgâr türbininin maliyet dağılımı – Bernstein Research, 2007

BÖLÜM 2

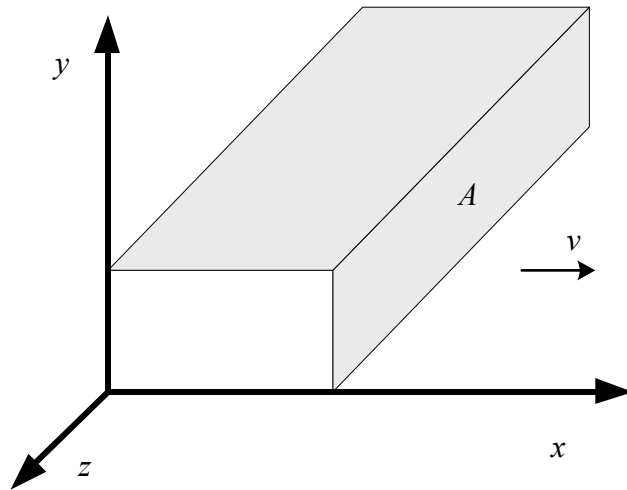
RÜZGÂR GÜCÜ ANALİTİK MODELİ

1.2 İdeal Bir Türbinde Rüzgâr Gücü

m kütleli, x doğrultusunda v hızı ile esen rüzgâr paketinin kinetik enerjisi (2.1) eşitliği ile hesaplanır ve birimi J' dur.

$$U = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2 \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte A rüzgâr paketinin kesit alanı, ρ hava yoğunluğu ve x rüzgâr paketinin kalınlığıdır. Bu rüzgâr paketi (şekil 2.1)'deki gibi tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1 v hızı ile hareket eden rüzgâr paketi.

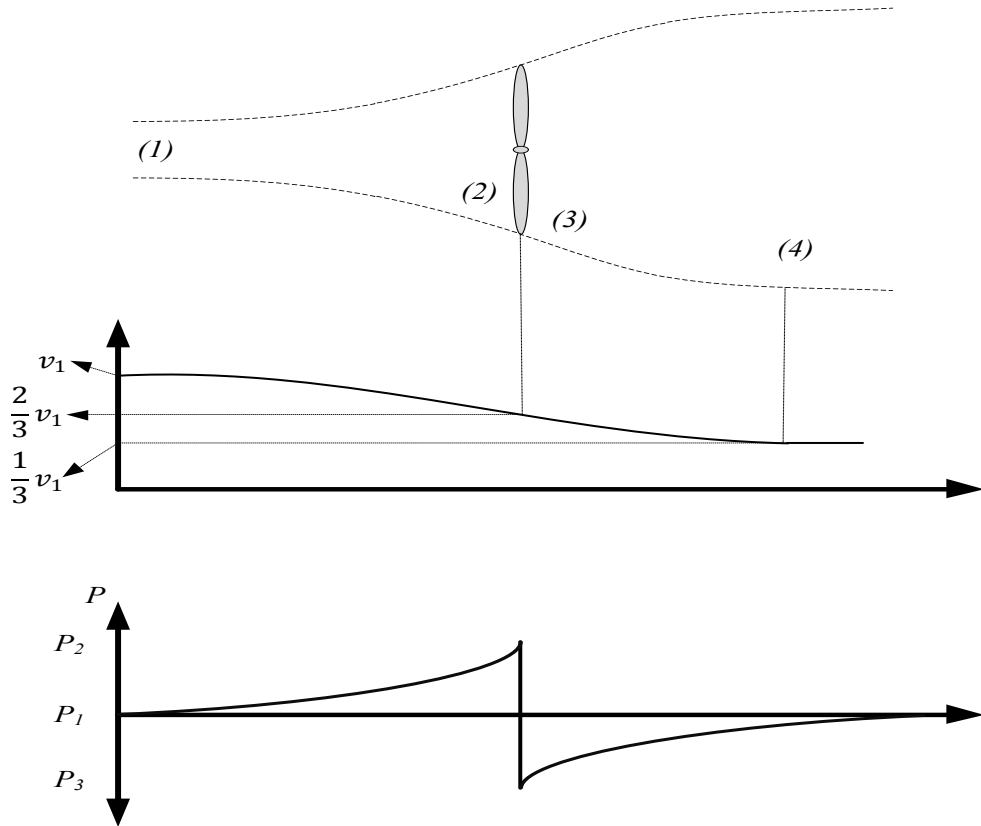
Rüzgâr paketi x doğrultusunda hareket ederken, paketin arka kısmının orijinde sabit olduğu düşünülerek, x 'in artışı ile kütlenin de homojen olarak arttığı ve sonuç olarak kinetik enerjinin arttığı görülmektedir.

Rüzgâr gücü, kinetik enerjinin zamana bağlı türevi ile ifade edilir ve birimi W' tır.

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

Hareket eden rüzgâr paketini kesecek şekilde türbin yerleştirilmesi durumunda rüzgâr hızında, basıncında ve kesit alanındaki değişiklikler şekilde görüldüğü gibidir.

(Şekil 2.2)'de görüldüğü gibi, tam türbin kanatlarında rüzgâr hızı azalmakta, yarıçap artmakta ve basınç atmosfer basıncının üzerine çıkmaktadır. Kanatların arkasında ise basınç atmosfer basıncının altına düşmekte ve rüzgâr hızı azalmaya devam etmektedir. Rüzgâr hızının azalması ile hava paketinin sahip olduğu kinetik enerji potansiyel enerjiye dönüşmektedir [2]. Optimum şartlar altında rüzgâr gücü türbine aktarılırken (2.3), (2.4), (2.5) ve (2.6) eşitlikleri geçerlidir.



Şekil 2.2 Rüzgâr türbininden geçen havanın oluşturduğu kanal

$$v_2 = v_3 = \frac{2}{3} v_1 \quad (2.3)$$

$$v_4 = \frac{1}{3} v_1 \quad (2.4)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2} A_1 \quad (2.5)$$

$$A_4 = 3A_1 \quad (2.6)$$

Ulaşılan mekanik güç, rüzgâr giriş ve çıkış güçleri arasındaki farka eşittir.

$$P_m = P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_4 v_4^3) = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8}{9} A_1 v_1^3 \right) \quad (2.7)$$

Bu eşitlik bize rüzgâr gücünün $8/9$ ' unun mekanik güce çevrilebileceğini göstermektedir. Ancak burada kafa karıştırıcı nokta türbinin kanatlarının süpürdüğü alan olan A_2 yerinde A_1 değerinin kullanılmış olmasıdır. Gerçek değeri yerine koyduğumuzda ulaşacağımız eşitlik bize gerçek oranı vermektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) v_1^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_1 v_1^3 \right) \quad (2.8)$$

Son eşitlikte elde edilen $16/27 = 0,593$ oranı Betz katsayısı olarak da anılmaktadır. Bu oran, türbinin aynı noktadaki rüzgâr gücünün maksimum %59,3' ünü mekanik güce çevirebileceğini göstermektedir. Pratikte bu değer mekanik kayıplar nedeni ile daha da düşmektedir. %35-40 değerleri günümüz şartlarında iyi birer oran olarak kabul edilmektedir.

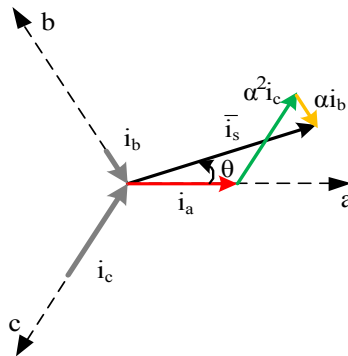
RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖR KONTROLÜNDE TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAMALAR

3.1 Uzak Vektör Kavramı

AC motorlar üç faz gerilim, akım ve akı değerlerine kompleks uzak vektör yaklaşımı yapılarak analiz edilebilir. Akımları ele alırsak, uzak vektörler şu şekilde tanımlanabilir; i_a , i_b ve i_c anlık stator akımları, $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$ ve $\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi}$ olmak üzere, kompleks stator akım vektörü (3.1) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$$\vec{i}_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \quad (3.1)$$

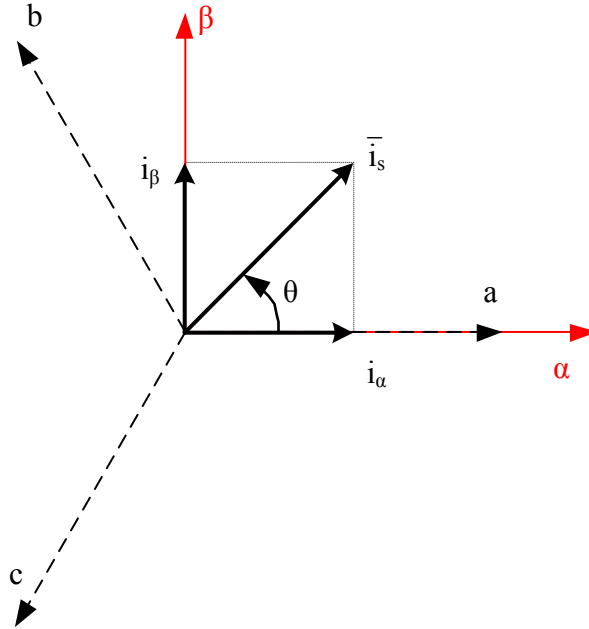
Bu kompleks stator akım vektörü (Şekil 3.1)'de üç fazlı bir sistem içerisinde gösterilmiştir. Bu vektör zamana bağlı üç koordinatlı sistemden zamanla değişmeyen iki koordinatlı sistemine transfer edilebilir. Bu dönüşüm iki kademede incelenebilir [3].



Şekil 3.1 abc ekseninde stator uzak vektörü ve bileşenleri

3.1.1 Clarke Dönüşümü

Üç koordinatlı uzay vektör, iki koordinatlı ortogonal $\alpha\beta$ ekseninde tanımlanabilir. Bu yaklaşımda a eksenini ile α ekseninin çakışık olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 $\alpha\beta$ ekseninde stator uzay vektörü ve bileşenleri

$$i_{\alpha} = i_a \quad (3.2)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (3.3)$$

Bu yaklaşım ile üç koordinatlı sistem ortogonal iki koordinatlı sisteme dönüştürülebilir. Ancak sistem hala zamana bağlı olarak değişmektedir.

3.1.2 Park Dönüşümü

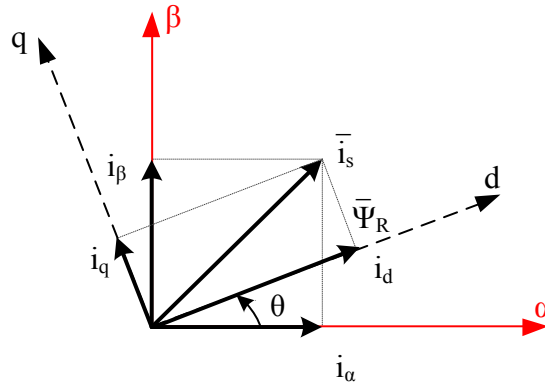
Bu yaklaşım ile iki koordinatlı ortogonal $\alpha\beta$ sabit eksen takımından yine iki koordinatlı dq dönen eksen takımına dönüştürülebilir. AC motor için; d -ekseni, rotor akı vektörü ile aynı hizada olduğunda $\alpha\beta$ ve dq eksen takımları arasındaki ilişki (Şekil 3.3)'te belirtilmiştir. Ayrıca dönüşüm eşitlikleri θ , rotor akı pozisyonu olmak üzere (3.4) ve (3.5) eşitliklerindeki gibidir.

$$i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \quad (3.4)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \quad (3.5)$$

Bu iki bileşen $\alpha\beta$ bileşenlerine ve rotor akı pozisyonuna bağlıdır. Eğer akı pozisyonu doğru olarak bilinirse, dq bileşenlerinin zamana olan bağımlılıkları ortadan kalkar. Bu sayede;

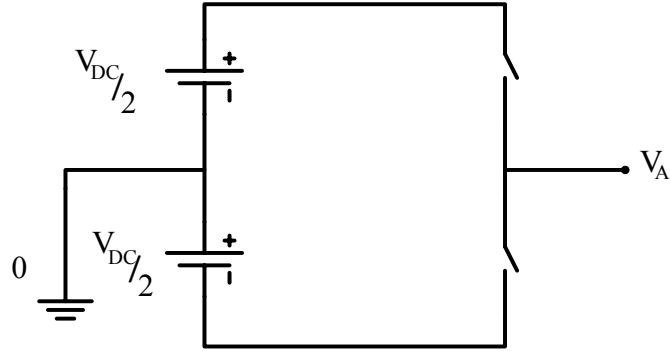
- İki koordinatlı zamanla değişmeyen bir sistem elde edilir.
- d -ekseni akı bileşeni, q -ekseni moment bileşeni olarak adlandırılır. Bu ayrışım sayesinde direkt olarak moment kontrolü büyük bir kolaylık kazanır.



Şekil 3.3 $\alpha\beta$ ve dq ekseninde stator akım vektörü ve bileşenleri

3.2 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)

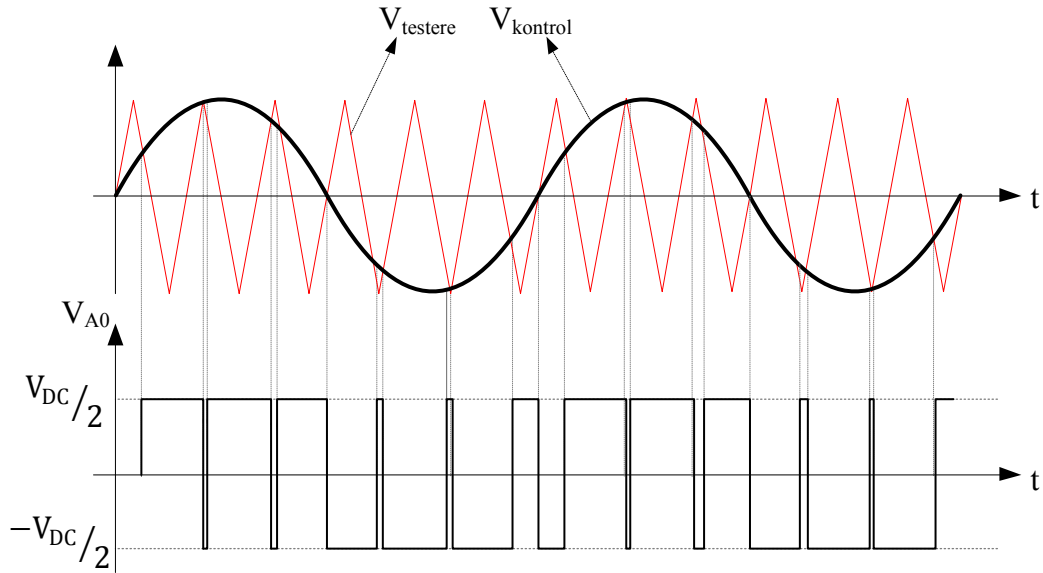
Temel darbe genişlik modülasyonu için tek fazlı bir sistem örneği (Şekil 3.4)'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.4 Tek fazlı inverter

(Şekil 3.5)'ten görüleceği gibi inverter çıkış gerilimi şu şekilde belirlenir:

- $V_{\text{kontrol}} > V_{\text{testere}}$, $V_{A0} = V_{DC}/2$
- $V_{\text{kontrol}} < V_{\text{testere}}$, $V_{A0} = -V_{DC}/2$



Şekil 3.5 Temel PWM uygulaması

Ek olarak, inverter çıkış gerilimi şu özelliklere sahiptir:

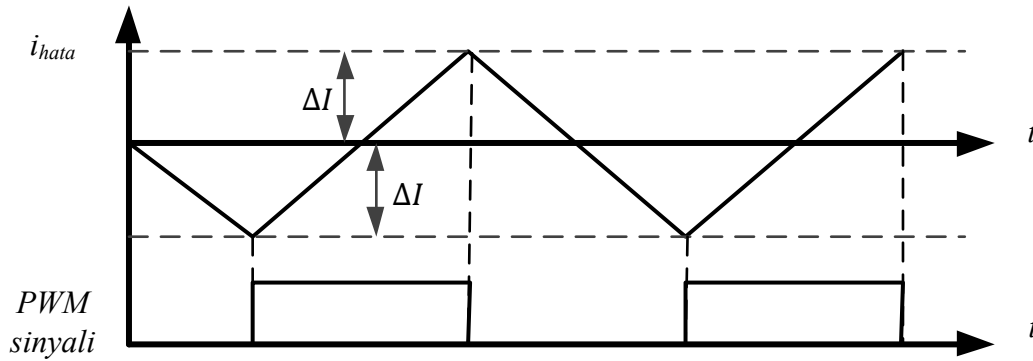
- PWM frekansı V_{testere} sinyalinin frekansı ile aynıdır.
- Genlik V_{kontrol} sinyalinin genliği ile kontrol edilir.
- Temel frekans V_{kontrol} sinyalinin frekansı ile kontrol edilir.

Modülasyon indeksi (m), (3.6) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$$m = \frac{V_{\text{kontrol}}}{V_{\text{testere}}} = \frac{|\bar{V}_{A0}|}{V_{\text{DC}}/2} \quad (3.6)$$

3.3 Histerezis Akım Kontrolü (HAK)

Histerezis akım kontrolü uygulamasının kolaylığı nedeni ile gerilim beslemeli inverter kontrolünde sıkça kullanılmaktadır. Histerezis kontrol temel olarak, inverter çıkış akımının belirli bir bant içerisinde kontrol edilmesi yöntemidir. Bu yöntemde sabit bir anahtarlama frekansı yoktur ve çıkış endüktansının değeri ile anahtarlama frekansı değişir. Bu bir dezavantajdır, çünkü değişken frekans filtre tasarımını güçleştirmektedir. Bant genişliğinin düşük seçilmesi akım kalitesinin ve frekansın yükselmesine ancak bununla birlikte kayıpların da artmasına neden olmaktadır [4].



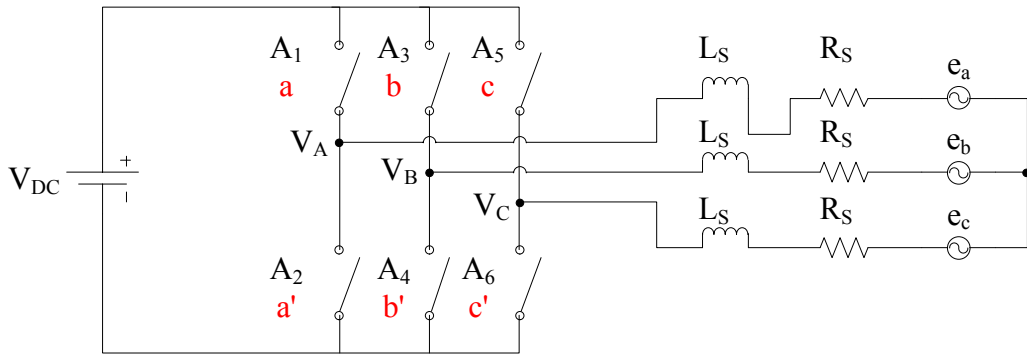
Şekil 3.6 HAK yönteminde PWM sinyali

Histerezis akım kontrol yönteminde çıkış akımı belirlenen bant içerisinde hareket etmektedir. Ölçülen akım ile referans akımı karşılaştırılarak akım hatası elde edilir. Şekilde görüldüğü gibi anahtarlama yapılarak çıkış akımı kontrol edilir. Akım hatası ($i_{\text{aref}} - i_a$) yükselip bandın üst sınırına geldiğinde ölçülen faz akımının azaldığı anlaşılır ve ilgili fazın üst kol anahtarı devreye sokularak faz akımının tekrar artması sağlanır.

Bu işlemin tam tersi de akım hatasının azalarak negatif olup bandın alt sınırına gelmesi ile uygulanır. Böylece üç faz akımı da belirlenen referansı takip ederek bant içinde hareket ederler.

3.4 Uzay Vektör Modülasyonu (UVM)

Tipik 3 fazlı bir inverter devre şeması (Şekil 3.6)'da görülmektedir. Çıkış gerilimini şekillendiren A_1 ve A_6 anahtarları a , b , c ve a' , b' , c' sinyalleri ile kontrol edilmektedirler. Aynı kol anahtarlarının hiçbir zaman aynı anda iletimde olmamalıdır. Buradan yola çıkarak, üst kol anahtarları A_1 , A_2 ve A_3 'ün iletim ve kesim durumları dikkate alınarak çıkış gerilimi belirlenebilir [5].



Şekil 3.7 Üç fazlı inverter topolojisi

Anahtarlama vektörü $[a \ b \ c]^t$ ve faz-faz gerilim vektörü $[V_{AB} \ V_{BC} \ V_{CA}]^t$ arasındaki ilişki (3.7) eşitliğinde verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{DC} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

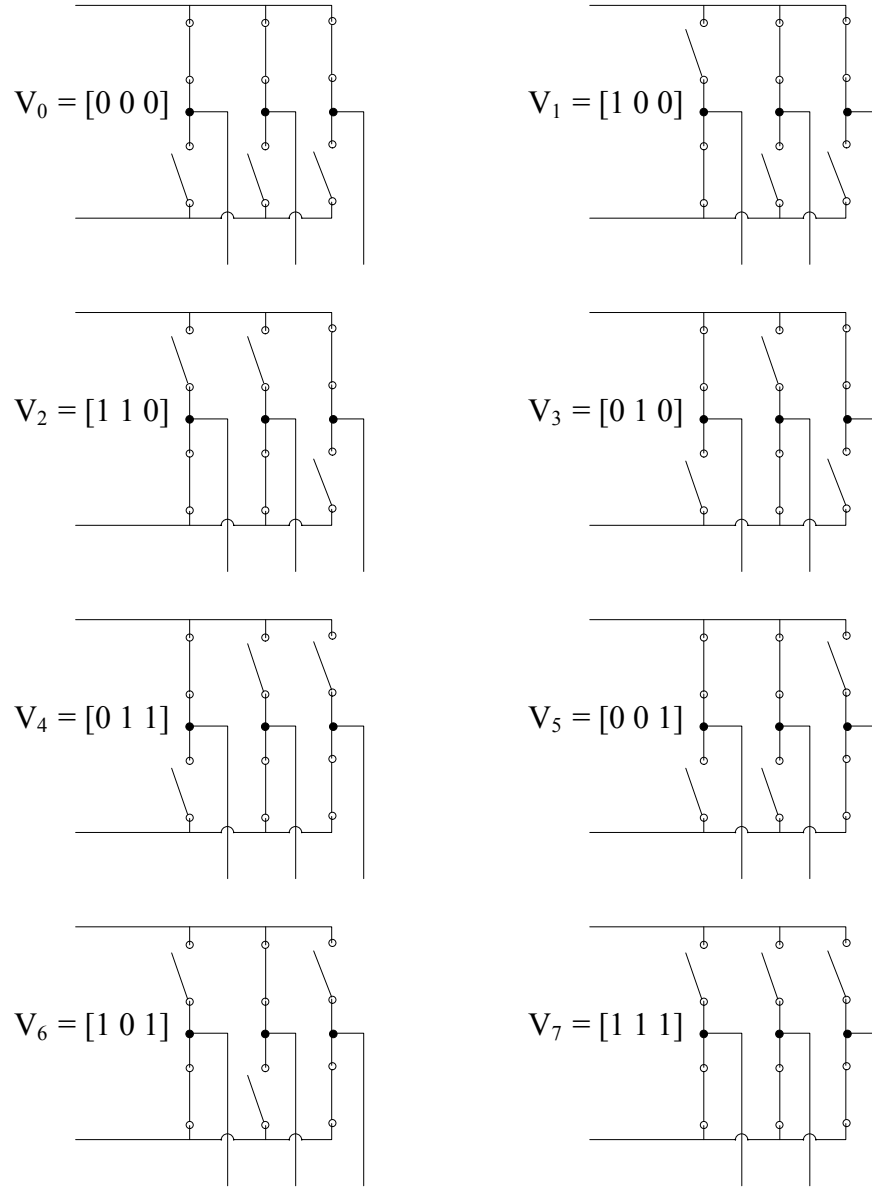
Aynı şekilde, Anahtarlama vektörü $[a \ b \ c]^t$ ve faz-nötr gerilim vektörü $[V_{AN} \ V_{BN} \ V_{CN}]^t$ arasındaki ilişki (3.8) eşitliğinde verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

(Şekil 3.6)'daki inverter topolojisinden de görüleceği üzere, alt ve üst kol anahtarlarının iletim ve kesim durumlarına göre sekiz olası anahtarlama örneği oluşmaktadır. (3.7) ve (3.8) eşitliklerine göre, sekiz anahtarlama vektörü, DC bara V_{DC} değerine göre faz-nötr ve faz-faz gerilimleri olarak Çizelge 3.1'de ve inverter gerilim vektörleri olarak (Şekil 3.7)'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Anahtarlama vektörleri, faz-nötr gerilimleri ve faz-faz gerilimleri

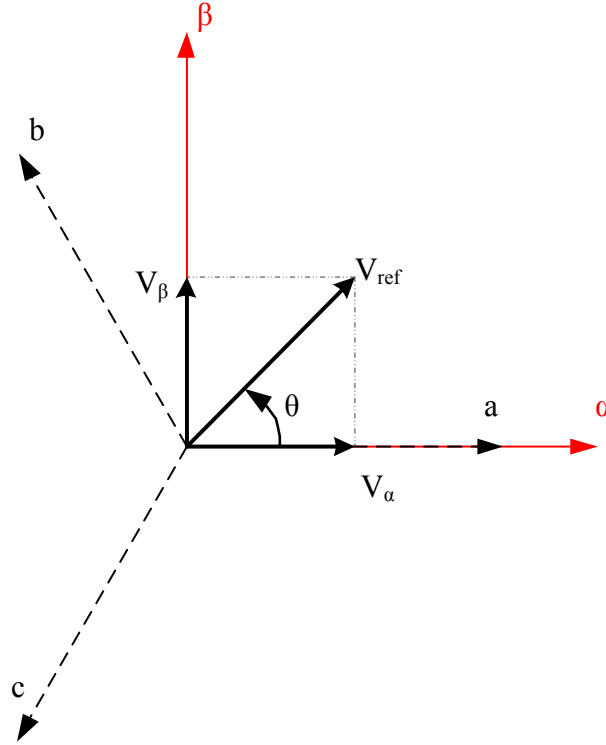
Gerilim Vektörleri	Anahtarlama Vektörleri			Faz-Nötr Gerilimleri			Faz-Faz Gerilimleri		
	a	b	c	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
V_2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
V_3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
V_4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
V_5	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
V_6	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0



Şekil 3.8 Gerilim uzay vektörleri

Uzay vektör modülasyonu inverterin farklı bir sıra ile anahtarlanarak sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniğine göre çıkış akım ve geriliminde daha az harmonik bileşen oluşmasını ve DC baranın daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir modülasyon tekniğidir.

Uzay vektör modülasyonu uygulamasında, abc eksen takımındaki gerilim değerleri yatay α ve dikey β , birbirine 90° açı ile tanımlanmış $\alpha\beta$ sabit eksen takımına transformasyon matrisi yardımı ile taşınabilir.



Şekil 3.9 abc ve $\alpha\beta$ eksenlerinde gerilim uzay vektörleri

(Şekil 3.9)'dan yola çıkarak, bu iki referans eksen takımı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc} \quad (3.9)$$

Burada f akım ve gerilim değerlerini ifade etmek üzere,

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

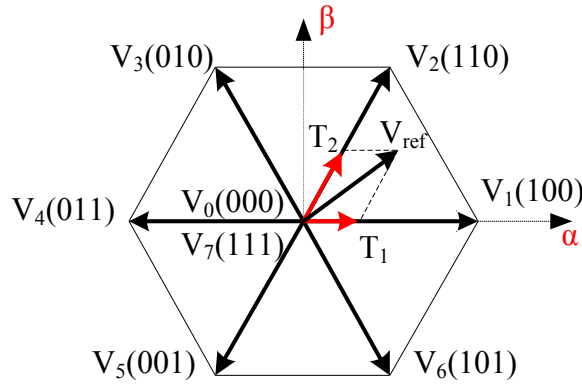
$$\mathbf{f}_{\alpha\beta 0} = [f_d \quad f_q \quad f_0]' \quad (3.11)$$

$$\mathbf{f}_{abc} = [f_a \quad f_b \quad f_c]' \quad (3.12)$$

(Şekil 3.9)'da görüldüğü üzere, bu transformasyon, abc 'nin üç boyutlu bir koordinat sistemindeki iki boyutlu ve $[1 \ 1 \ 1]^t$ vektörüne dik eksen takımına (eşdeğer $\alpha\beta$ eksen takımı) ortogonal yaklaşımıdır. Sonuç olarak, sıfırdan farklı altı vektör ve iki sıfır vektörü oluşmaktadır. Sıfırdan farklı bu vektörler ($V_1 - V_6$) (Şekil 3.10)'daki altıgeni

oluşturmakta ve DC baradan gelen gücü yüke aktarmaktadırlar. Bu altı vektörden herhangi iki komşu vektör arasındaki açı 60 derecedir. Diğer taraftan, iki sıfır vektörü ($V_0 - V_7$) orijinde yer almakta ve yüke sıfır gerilimi uygulamaktadır. Bu sekiz vektöre temel uzay vektörleri denmekte ve $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ve V_7 olarak isimlendirilmektedirler.

Uzay vektör modülasyonunun amacı istenen referans gerilimi V_{ref} ' i elde edecek şekilde bu sekiz vektörü kullanmaktır. Bu işlem belirli bir periyot içerisinde ortalama olarak V_{ref} değerine eşit gerilimi üretecek şekilde anahtarlama seçimi ile yapılır.



Şekil 3.10 Uzay vektörleri

Uzay vektör modülasyonu bu adımlar ile gerçekleştirilmektedir.

- $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ ve θ değerleri belirlenir.
- T_1, T_2, T_3 değerleri belirlenir.
- Anahtarlama süreleri ($A_1 - A_6$) hesaplanır.

3.4.1 $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ ve θ değerlerinin belirlenmesi

(Şekil 3.8)'den hareketle f temel frekans olmak üzere, $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ ve θ değerleri şu şekilde hesaplanabilir.

$$V_\alpha = V_{AN} - V_{BN} \cos 60 - V_{CN} \cos 60 = V_{AN} - \frac{1}{2} V_{BN} - \frac{1}{2} V_{CN} \quad (3.13)$$

$$V_\beta = 0 + V_{BN} \cos 30 - V_{CN} \cos 30 \quad (3.14)$$

$$= V_{AN} + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{BN} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{CN} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$|\bar{V}_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (3.17)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_\alpha}{V_\beta} \right) = \omega t = 2\pi f t \quad (3.18)$$

3.4.2 T_1, T_2, T_3 değerlerinin belirlenmesi

(Şekil 3.9)'dan hareketle T_1, T_2, T_3 değerleri şu şekilde hesaplanabilir.

- 1. Sektördeki anahtarlama süreleri ($0 \leq \theta \leq 60$):

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (3.19)$$

$$T_z \bar{V}_{ref} = (T_1 \bar{V}_1 + T_2 \bar{V}_2) \quad (3.20)$$

$$T_z |\bar{V}_{ref}| \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{DC} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{DC} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$T_1 = T_z a \frac{\sin(\pi/3 - \theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.22)$$

$$T_2 = T_z a \frac{\sin(\theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.23)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (3.24)$$

$$T_z = 1/f_z \quad (3.25)$$

$$a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2V_{DC}}{3}} \quad (3.26)$$

- $n = 1,2,3,4,5,6$ ve $0 \leq \theta \leq 60$ olmak üzere genel eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{DC}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \theta + \frac{n-1}{3}\pi \right) \right)$$

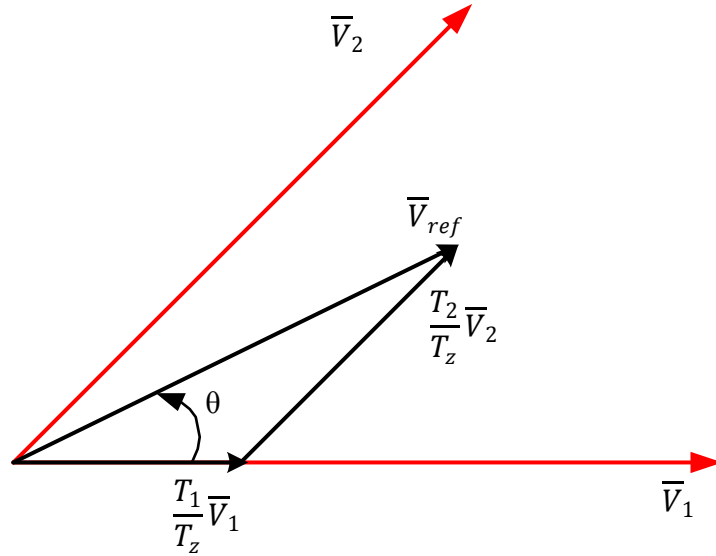
$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{DC}} \left(\sin \frac{n}{3} - \theta \right)$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{DC}} \left(\sin \frac{n}{3}\pi \cos \theta - \cos \frac{n}{3}\pi \sin \theta \right) \quad (3.27)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{DC}} \left(\sin \left(\theta - \frac{n-1}{3}\pi \right) \right)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{DC}} \left(-\cos \alpha \sin \frac{n-1}{3}\pi + \sin \alpha \cos \frac{n-1}{3}\pi \right) \quad (3.28)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (3.29)$$



Şekil 3.11 1. sektörde referans vektörün komşu vektörler cinsinden gösterimi

Ancak tüm bunlara rağmen KMSG, rotorda kullanılan mıknatısların yüksek maliyetleri ve çalışma noktasına göre değiştirilemeyen sabit uyarma gibi dezavantajları da bünyesinde bulundurmaktadır. KMSG rotor konfigürasyonuna göre sınıflandırılabilir.

3.6.1 Dahili Manyetikli KMSG

Bu konfigürasyonda mıknatıslar rotor gövdesinin içine gömülmüştür. Dahili manyetikler KMSG’ de manyetik çıkıklığa sebep olmaktadır. Bu nedenle d -ekseni endüktansı q -ekseni endüktansından küçüktür. Bunun nedeni d -ekseni hava aralığının q -ekseni hava aralığından büyük olmasıdır. Bu fark nedeni ile kalıcı mıknatıslardan kaynaklanan momente ek olarak bir relüktans momenti oluşur ve böylelikle rotor pozisyonu kolaylıkla saptanabilir. Ancak üretimi zor ve maliyetlidir.

3.6.2 Yüzey Montajlı KMSG

Bu konfigürasyonda mıknatıslar rotor gövdesinin dış yüzeyine monte edilmiştir. Kalıcı mıknatısın manyetik geçirgenliği yaklaşık havanın manyetik geçirgenliği ile eşittir. Bu sabit ve geniş bir hava aralığı anlamına gelmektedir. Böylelikle d -ekseni ve q -ekseni endüktansları birbirine eşittir ve çıkıklık oranı ($\zeta = L_d/L_q$) 1’ dir. Böylelikle relüktans momenti oluşmaz. Dahili manyetikli konfigürasyona göre üretimi daha basit ve az maliyetlidir.

3.6.3 Matematiksel Tanımlamalar

3.6.3.1 dq -ekseni Gerilim Eşitlikleri

v_d, v_q , dq -ekseni stator gerilimleri, i_d, i_q dq -ekseni stator akımları, R_s stator direnci, ψ_d, ψ_q dq -ekseni stator akıları, ω_e elektriksel hız olmak üzere gerilim eşitlikleri dq -ekseninde (3.27) ve (3.28) eşitliğindeki gibi tanımlanmıştır.

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (3.27)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (3.28)$$

3.6.3.2 dq -ekseni Akı Eşitlikleri

L_d, L_q , dq -ekseni endüktansları, ψ_m , kalıcı mıknatıs akısı olmak üzere akı eşitlikleri dq -ekseninde (3.29) ve (3.30) eşitliğindeki gibi tanımlanmıştır.

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (3.29)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (3.30)$$

3.6.3.3 Moment Eşitliği

Elektromanyetik moment eşitliği elektro manyetik güç eşitliğinden türetilebilir. (3.31) ve (3.32) eşitliklerinde ω_m rotorun mekanik hızı olmak üzere elektromanyetik güç ve elektriksel hız aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$P_{em} = \omega_m T_e = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.31)$$

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (3.32)$$

Buradan, elektromanyetik moment eşitliği türetilip akı eşitlikleri yerlerine koyulduğunda (3.33) ve (3.34) eşitlikleri elde edilir.

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.33)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3.34)$$

(3.34) eşitliğinde görüldüğü gibi ilk terim akı ve i_q akımının oluşturduğu moment, ikinci terim ise manyetik çukırlıktan kaynaklanan relüktans momentidir. Yüzey montajlı üretilen KMSG relüktans momentine sahip değildir. Bunun nedeni L_d ve L_q endüktanslarının eşit olmasıdır. Sonuç olarak moment eşitliği (3.35)'teki gibidir.

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_d i_q) \quad (3.35)$$

3.6.3.4 Güç Eşitlikleri

(3.36) ve (3.37) aktif ve reaktif güç eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.36)$$

$$Q = v_d i_q - v_q i_d \quad (3.37)$$

3.6.3.5 Makinenin Genel Hareket Eşitliği

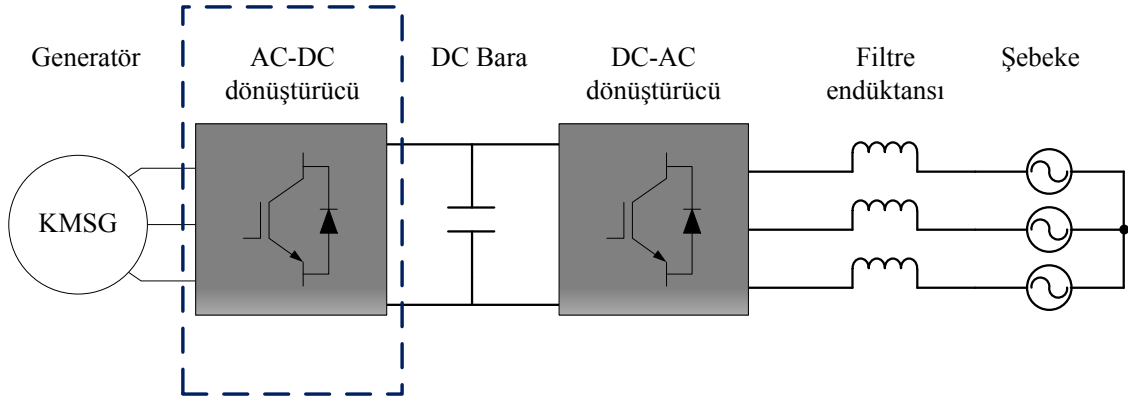
T_L , yük momenti, B , viskoz sürtünmesi, T_d , sürtünme momenti ve J , atalet momenti olmak üzere KMSG hareket eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_e = T_L + B\omega_m + T_d + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.38)$$

RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖRLERİNİN MODERN KONTROLÜ

4.1 KMSG Kontrolü

Bu bölümde alan yönlendirmeli kontrolün KMSG kontrolünde kullanılması incelenmiştir. Sistem kontrol döngüleri verilmiş, HAK tekniği ile PWM sinyalleri üretilmiştir.



Şekil 4.1 Sistemin genel diyagramı

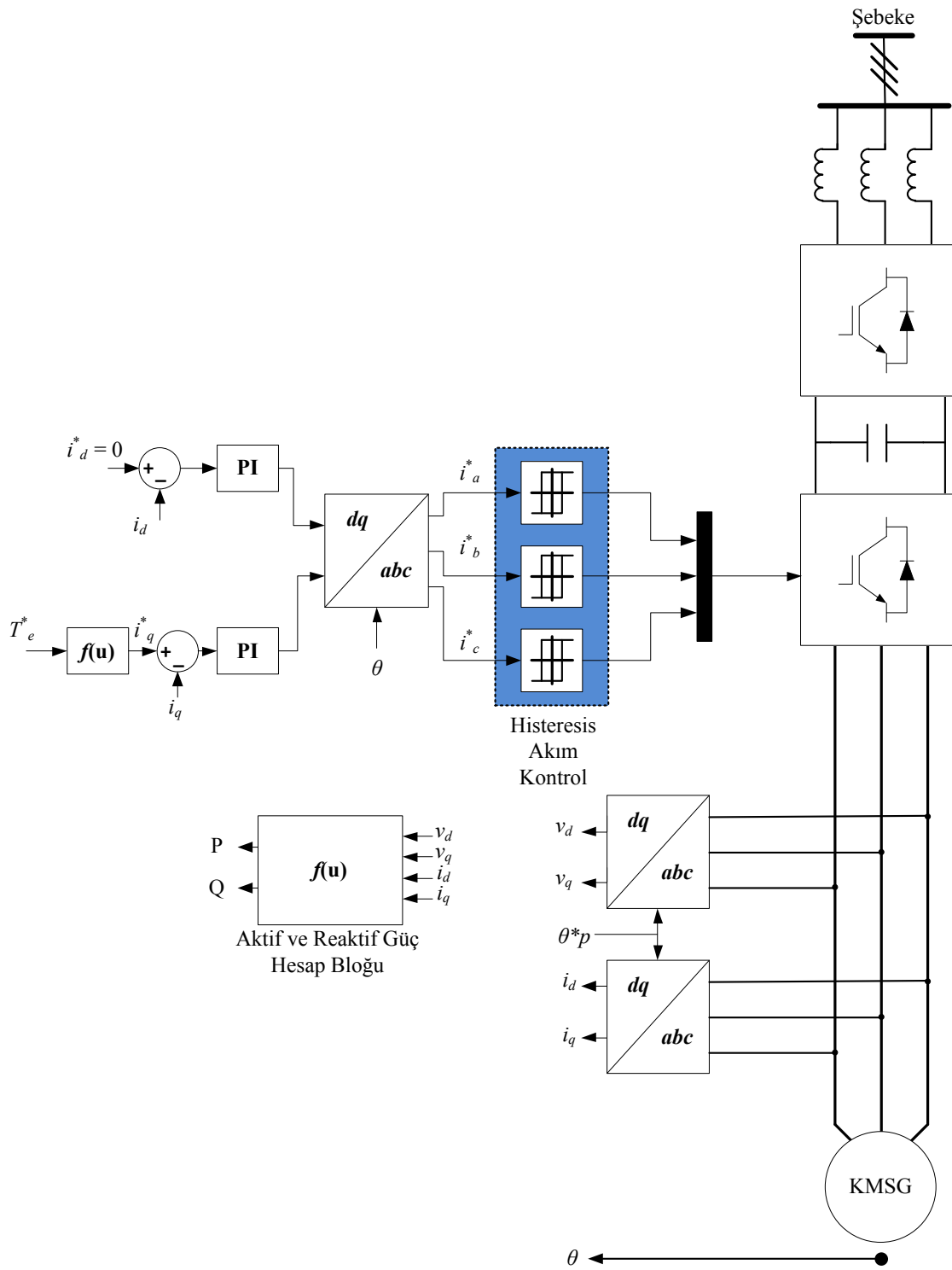
4.1.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri giderek daha fazla ilgi görmektedir, bunun en büyük nedeni değişken hızlarda rüzgârdan maksimum güç elde edilebilmesidir. Elde edilebilecek maksimum güç değişken rüzgâr hızından ziyade türbinde kullanılan kontrol stratejisi ile ilgilidir. KMSG kullanılan değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde rotor pozisyonunu ve hızını kullanan AYK stratejisi büyük popülarite kazanmıştır.

AYK, stator akımının kontrolü ile makine momentinin dolaylı yoldan kontrol edilmesi ile gerçekleştirilir. Kontrol stratejisi dq referans ekseninde tanımlanmaktadır. Yüzey montajlı KMSG için dq ekseninde moment (3.34) eşitliğinde tanımlanmaktadır.

Bu tezde kullanılan KMSG yüzey montajlı kalıcı mıknatıs yapısına sahiptir. Bu nedenle makinenin L_d ve L_q endüktansları birbirine eşittir. Bu durum moment eşitliğini (3.35)'teki gibi sadeleştirerek kontrol stratejisinin uygulanmasını da kolaylaştırmaktadır.

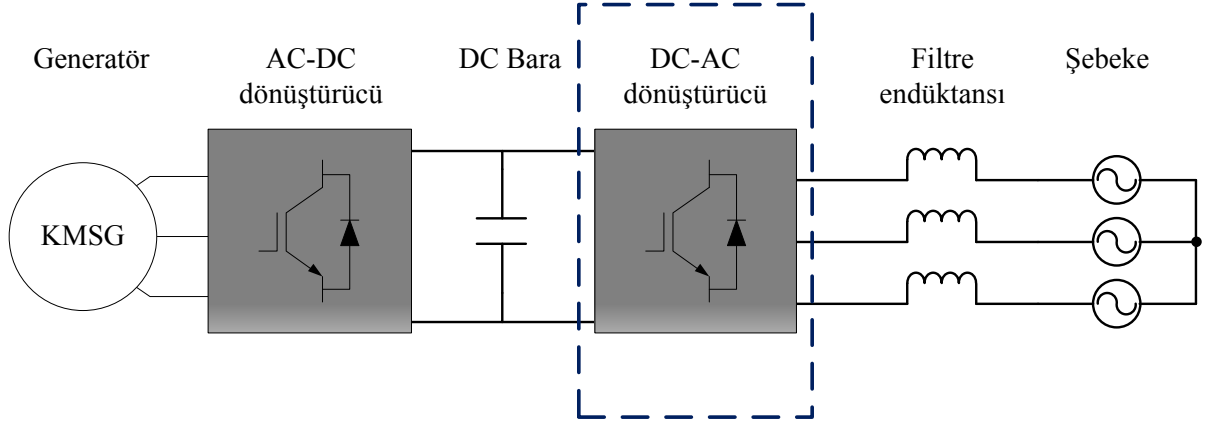
Görüldüğü gibi Ψ_m sabit olmak koşulu ile i_q kontrol edilerek moment de kontrol edilebilmektedir. Moment kalıcı mıknatıs akısı ve i_q arasındaki açı ile kontrol edilir. Bu açı $i_d = 0$ ' a i_q da istenen değere kontrol edilerek 90° ' de tutulur. Böylelikle istenilen i_q değeri ile istenen moment elde edilmiş olur.



Şekil 4.2 KMSG alan yönlendirmeli kontrol döngüleri

4.2 İnverter(DC-AC Dönüştürücü) Kontrol Stratejileri

İnverter kontrolü için çok sayıda değişik kontrol stratejisi bulunmaktadır. Bunların hepsinde DC bara kontrol edilerek, şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücün kontrolüne, şebeke senkronizasyonuna ve kalitesine odaklanılmaktadır.



Şekil 4.3 Genel sistem diyagramı

Bu stratejiler kullanılan anahtarlama modülasyonu tekniklerine göre ikiye ayrılmaktadır. İlki UVM tekniği kullanılması durumundaki strateji, ikincisi ise HAK tekniği kullanılması durumundaki stratejidir.

İki durumda da kontrol stratejileri iç içe geçmiş iki kontrol döngüsü içermektedir. İç döngüler şebeke akımlarını kontrol etmekte, dış döngüler ise DC barayı ve reaktif gücü kontrol etmektedir. İç kontrol döngüleri şebeke akımlarını kontrol ederek şebekeye aktarılan gücün kalitesini de belirlemektedirler. Dış kontrol döngüleri de DC baradan şebekeye doğru olan güç akışını kontrol ederek aktif ve reaktif güç regülasyonunu sağlamaktadır [6].

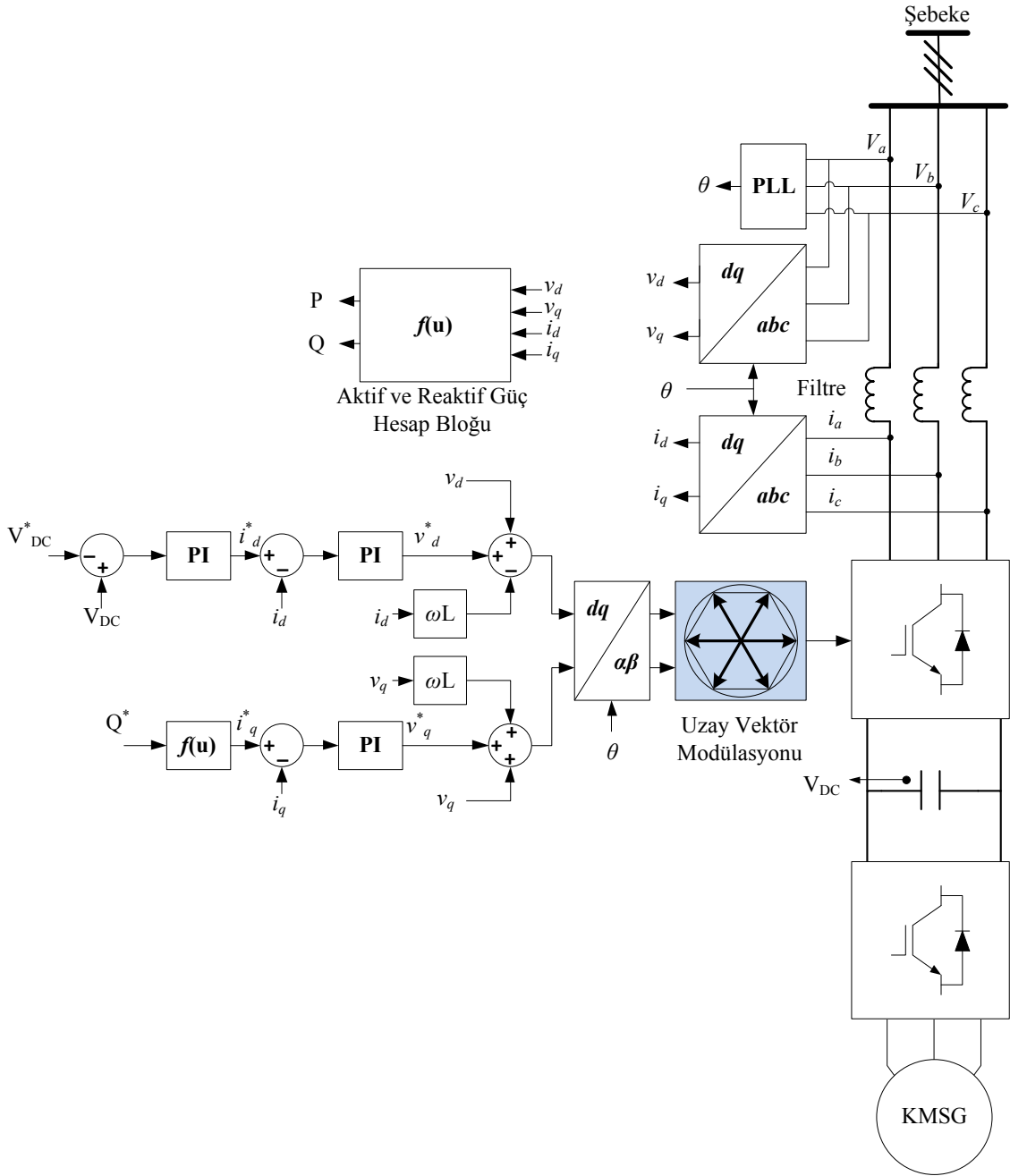
İki stratejide de güç akış kontrolü aynı şekilde yapılır. Aktif ve reaktif güç eşitlikleri dq -referans eksen takımında (4.1) ve (4.2) eşitliklerindeki gibi tanımlanmıştır.

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) \quad (4.2)$$

(4.1) ve (4.2) eşitliklerinden görüldüğü gibi, i_d ve i_q akımları kontrol edilerek aktif ve reaktif güç direk olarak kontrol edilebilmektedir. Temelde, kontrolün amacı rüzgâr türbini tarafından üretilen tüm aktif gücü şebekeye aktarmak ve böylelikle hiç reaktif

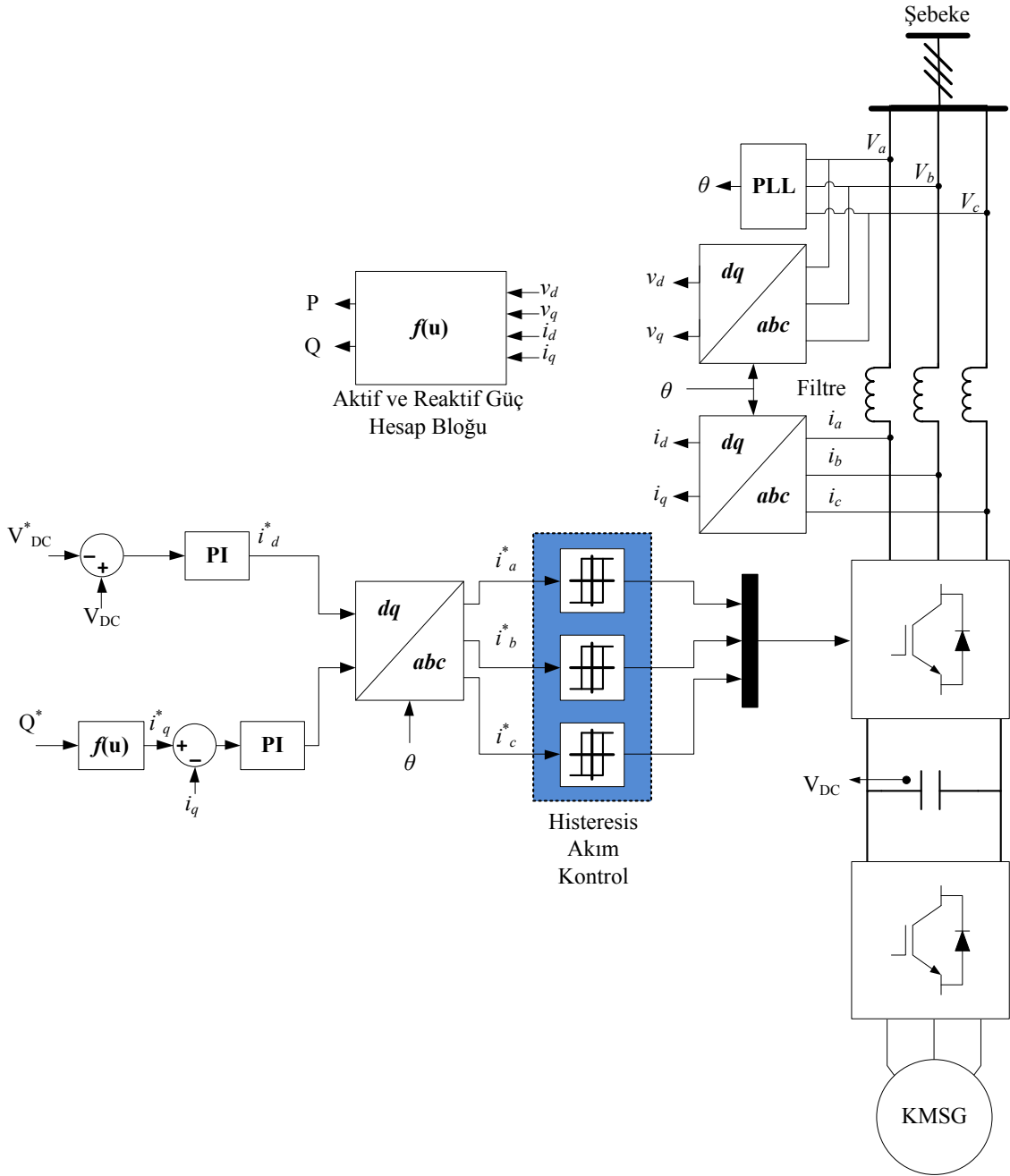
güç aktarmamaktır. Böylelikle birim güç faktörü elde edilmektedir. Şebeke tarafından aksi bir talep gelmedikçe reaktif güç üretilmez.



Şekil 4.4 UVM tekniğinde kontrol döngüleri

İki kontrol stratejisinde de akımlar senkron dönen eksen takımı üzerinde kontrol edilir. Bu klasik bir kontrol yöntemidir ve *dq* kontrol olarak adlandırılır. Bu kontrolde şebeke gerilimleri ve akımları *abc*-eksen takımından *dq*-eksen takımına transfer edilir.

Böylelikle zamana bağlı değişen akım ve gerilim değerleri PI kontrolörler ile kolaylıkla kontrol edilebilecek DC değerlere dönüşmüş olurlar.



Şekil 4.5 HAK tekniğinde kontrol döngüleri

Uzay vektör modülasyonu tekniği kullanılan kontrol stratejisinde PI kontrolörlerin çıkışlarına çapraz kuplaj terimleri ve gerilim ileri beslemeleri eklenerek kontrol performansı iyileştirilir. Tüm bu eklemeler sonucunda ulaşılan değer uzay vektör modülasyonu tekniğinde kullanılacak gerilim referansıdır.

Bu referanslar dq -eksen takımından $\alpha\beta$ -eksen takımına transfer edilerek uzay vektör modülasyonu tekniğince kullanılır (Şekil 4.2).

Histerisiz akım kontrolü tekniğinin kullanıldığı kontrol stratejisinde PI kontrolörlerin çıkışları akım referansları olarak dq -eksen takımından abc -eksen takımına transfer edilir ve her faz için ayrı olarak histerisiz kontrolörden geçirilir (Şekil 4.3).

1,5 MVA GÜCÜNDE BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN ELEKTRİKSEL GÜÇ KATI TASARIMI

5.1 Giriş

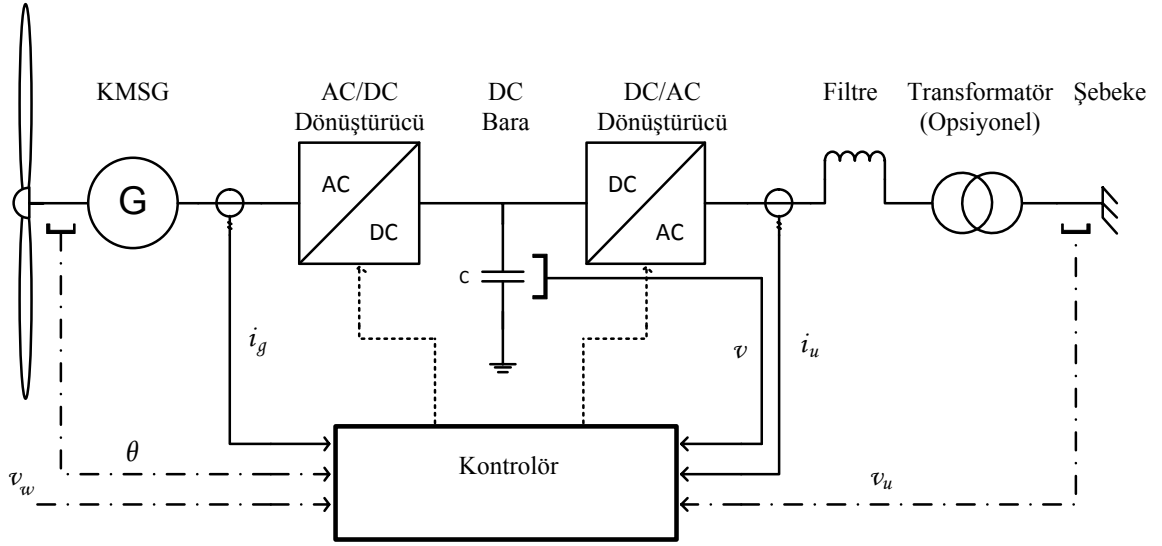
Rüzgâr enerjisi çevrim sistemlerinin tasarımı birden fazla akademik disiplinin ortak çalıştığı bir süreçtir. Elektrik generatörü ve güç elektroniği dönüştürücülerinden oluşan elektrik sistemi bile değişik alanlarda uzmanlaşmış elektrik mühendislerinin toplu çalışması sonucu tasarlanır. Bu alanlar başlıca; elektrik makine tasarımı, güç elektroniği, güç sistemleri ve kontrol sistemleri olarak sayılabilir. Tasarım sürecine nereden başlanacağı ve değişik sistemler arasındaki tasarım ilişkileri kritik ve hayati bir öneme sahiptir. Örnek olarak; makine tasarımcısı tasarım sürecinde, güç elektroniği mühendisleri ve kontrol mühendisleri ile iletişim kurarak tasarım özelliklerini ortaya çıkartmalıdır. Bu iletişim ile oluşan bilgi akışı sistem tasarımı sonlanana kadar, çift yönlü olarak ve gerektiği takdirde tüm tasarımcıların ellerindeki tasarım verilerini tekrar düzenledikleri bir süreçten oluşur.

5.2 Sistem Tanımı ve Ana Bileşenler

Söz konusu rüzgâr enerjisi çevrim sistemi 1,5 MVA nominal gücünde ve şebekeye bağlı bir tasarımıdır. Sistem; rüzgâr türbini, KMSG, AC/DC dönüştürücü, DC bara, DC/AC dönüştürücü, filtre endüktansı, opsiyonel transformatör, çeşitli sensörler ve koruma ekipmanlarından oluşmaktadır (Şekil 5.1).

Generatör doğrudan tahrik altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır, dişli kutusu yoktur. Sistem, generatör tarafında AC/DC dönüştürücünün ve şebeke tarafında DC/AC

dönüştürücünün kontrolüne dayanmaktadır. Şebeke gerilim seviyeleri araştırmaların başlangıcında fazlar arası, 480 V, 600 V ve 2400 V olarak belirlenmiştir. Bu seviyeler sistemin geriye kalan kısmının tasarımında belirleyici olmuştur. Bu üç şebeke gerilim seviyesinin sisteme olan etkileri, performansları ve maliyetleri incelenmiştir.



Şekil 5.1 Genel sistem diyagramı

5.3 Tasarım Yaklaşımı

Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi tasarımına büyük ölçekte ve tasarım detayları ile ilgili olarak küçük ölçekte iki şekilde yaklaşılabilir. Büyük ölçekte yaklaşım dendiğinde akla gelen başlıca problemler; şebeke ve generatör tarafında en uygun dönüştürücü topolojilerinin seçilmesi, optimum şebeke gerilim seviyelerinin belirlenmesi, generatör açık devre gerilim seviyesinin belirlenmesi ve uygun kontrol stratejisinin tasarlanması olarak sayılabilir. Küçük ölçekte detaylı yaklaşımda karşılaşılan problemler ise; kontrol döngülerinin tasarımı, kontrolör katsayılarının belirlenmesi, güç yarı iletken elemanlarının boyutlandırılması, pasif elemanların seçimi, soğutma sisteminin seçimi, fiziksel boyutun ve ağırlığın tahmini ve maliyet analizi olarak sayılabilir.

5.4 Dönüştürücü Topolojisinde Göz Önüne Alınması Gerekenler

Tipik bir güç dönüştürücü yapısı üç parçadan oluşur. Bunlar; generatör tarafında yer alan ve değişken frekanslı AC çıkışı DC baraya aktaran AC/DC dönüştürücü, iki dönüştürücü arasında DC barayı oluşturan kapasitör ve şebeke tarafında DC baradan

şebekeye senkronize bir şekilde AC güç akışını sağlayan DC/AC dönüştürücüdür [7],[8].

5.5 Şebeke ve Generatör Gerilim Seviyeleri

Generatör ve DC bara gerilimleri arasındaki ilişki doğrudan güç akış gereksinimleri tarafından belirlenir. Yüzey montajlı KMSG yapısı için aktif ve reaktif güç eşitlikleri (5.1) ve (5.2) eşitliklerindeki gibi yazılabilir.

$$P = \frac{E_{qg} |\vec{V}_r|}{x_d} \sin \delta \quad (5.1)$$

$$Q = \frac{E_{qg} |\vec{V}_r|}{x_d} \cos \delta - \frac{|\vec{V}_r|^2}{x_d} \quad (5.2)$$

E_{qg} , generatör q -ekseni ters emk gerilimi; $\vec{V}_r$, doğrultucu gerilim vektörü; x_d , d -ekseni generatör reaktansını ve δ , E_{qg} ve $\vec{V}_r$ arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Burada generatör ters emk geriliminin q -eksenine yapışık olduğu varsayılmıştır. Lineer modülasyon bölgesinde kalabilmek için, doğrultucunun ürettiği AC gerilim ve DC bara gerilimi arasında (5.3) eşitliği geçerlidir.

$$\sqrt{v_{dr}^2 + v_{qr}^2} \leq \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \quad (5.3)$$

v_{dr} ve v_{qr} sırasıyla, d -ekseni ve q -ekseni doğrultucu gerilimleri; V_{DC} , DC bara gerilimini temsil etmektedir. Buradan da görüldüğü gibi DC bara gerilimi seçilirken generatör tasarımı ile koordinasyon sağlanmalıdır. Generatörden alınacak maksimum güç, generatör geriliminin genliği ve δ açısı ile doğru orantılıdır. Generatör geriliminin yüksek DC bara gerilimi sağlaması için iki yol vardır. İlk yaklaşım, generatör ters emk gerilimi ile doğrultucu giriş gerilimi arasında küçük bir faz farkı bırakarak ters emk geriliminin genliğini arttırmaktır. Ters emk geriliminin genliğini arttırmak için generatörün faz sargılarındaki sarım sayısının artırılması gerekmektedir. Ters emk, sarım sayısı ile doğru orantılıdır ve generatör reaktansı ise sarım sayısının karesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, sargı reaktansındaki ciddi bir artış (5.1) ve (5.2) eşitliklerinden de anlaşılacağı üzere generatörün verimini düşürerek maksimum gücünü sınırlamaktadır.

Simülasyon sonuçlarına göre yüksek şebeke gerilimi, sistemin çeşitli elemanları üzerinde daha düşük bir akım stresi oluşturmaktadır. Yüksek şebeke gerilimi daha yüksek bir DC bara gerilimi gerektireceğinden DC bara kapasitörlerinde yüksek gerilim stresleri oluşturmaktadır. Bu bir dezavantaj olarak görülebilir aksine kapasitörlerin dalgalanma akımlarının belirli seviyelerde tutulması gerilim seviyesinin istenilen değerlerde tutulmasından daha büyük önem taşımaktadır.

5.6 Güç Kontrolünde Göz Önünde Bulundurulması Gerekenler

Güç kontrolünde iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi gerilim kontrolü, ikincisi akım kontrolü yaparak güç akışını sağlamaktır. Bugüne kadar yapılmış araştırmalar temel alınarak bu iki yöntemin karşılaştırılması aşağıdaki gibi maddeler halinde yazılabilir [9].

- Yüksek güçlü uygulamalarda kullanılan yarıiletkenler gerilim ve akım değerleri nedeni ile anahtarlama yetenekleri düşük güçteki muadillerine göre daha sınırlıdır. Akım kontrollü uygulamalarda ise istenilen harmonik seviyelerine ulaşabilmek için dönüştürücü yüksek frekans ile anahtarlama yapmak zorundadır. Bu da anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır.
- Gerilim kontrollü uygulamalar özellikle çok katmanlı dönüştürücüler için uygundur. Bunun nedeni akım kontrolü altında DC bara gerilim dalgalanmalarından oluşacak problemlerin ortadan kalkmasıdır.
- Gerilim kontrollü uygulamalar akım kontrollü uygulamalara göre daha basit yapıdadırlar. Özellikle daha az sayıda akım sensörüne ihtiyaç duyarlar. Yüksek güçlerde bu maliyete oldukça etki etmektedir.
- Gerilim kontrollü uygulamalar inverter gerilimi ve şebeke gerilimi arasındaki faz açısının belirli değerleri arasında kararlı çalışabilir. Bu doğrultucu için de geçerlidir. Ancak, akım kontrollü uygulamalar faz açısının kontrolünden daha çok şebeke ve inverter gerilimlerinin genlikleri ile kontrol edildikleri için daha geniş bir kararlı çalışma bölgesine sahiptirler.
- Gerilim kontrollü uygulamalarda, IEEE standartlarına göre belirlenmiş özel harmonik değerlerini sağlamak amacı kullanılan pasif elemanlar, özellikle endüktanslar, büyük önem taşımaktadırlar. Diğer taraftan, pasif elemanlar sistemin dinamik cevabını yavaşlatmaktadırlar.

- Akım kontrollü uygulamalarda, akı zayıflatma yöntemi ile generatörün çalışma bölgesi genişletilebilmektedir. Bu tasarımcının belirli bir sabit güç aralığı için daha küçük boyutlu bir generatör kullanmasına olanak sağlar.

Akım kontrolü, gerilim kontrolünden daha iyi dinamik performansa sahiptir. Bu tezde akım kontrollü dönüştürücüler kullanılmıştır.

5.7 Tasarım Optimizasyon Süreci

Akım kontrollü doğrultucuların kullanıldığı şebekeye bağlı rüzgâr güç sisteminin tasarım optimizasyon aşamaları aşağıdaki gibidir.

5.7.1 Adım 1

IEEE 519 harmonik standartlarına göre şebeke tarafındaki endüktansın değerine karar verilmiştir. Bu amaçla şebeke tarafındaki DC/AC dönüştürücü basit bir gerilim kaynağı olarak modellenmiş ve endüktans üzerinden şebekeye bağlanmıştır.

5.7.2 Adım 2

Adım 1' den yola çıkarak bulunan reaktans değeri ve şebeke gerilimi kullanılarak, $P=1,5$ MW ve $Q=0$ KVAR için v_{di} ve v_{qi} gerilim değerleri (5.4) ve (5.5) eşitliklerinden bulunmuştur. Bu denklemlerde v_{db} , şebeke geriliminin d -ekseni bileşeni v_{di} ve v_{qi} inverter gerilimi d -ekseni ve q -ekseni bileşenleri ve x , şebeke ve inverter arasındaki faz reaktansıdır. Bu reaktans sadece bir endüktansı ya da yükseltici bir transformatörü temsil edebilir.

$$P = \frac{v_{db}v_{di}}{x} \quad (5.4)$$

$$Q = \frac{v_{db}^2 - v_{db}v_{qi}}{x} \quad (5.5)$$

5.7.3 Adım 3

(5.6) eşitliği kullanılarak DC bara gerilimine karar verilmiştir.

$$\sqrt{v_{di}^2 + v_{qi}^2} \leq \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \quad (5.6)$$

5.7.4 Adım 4

Şebeke geriliminde %10 artış olduğu varsayılmıştır ve adım 3' te hesaplanan minimum DC bara gerilimi %10 arttırılmıştır. Sonuç olarak $V_{LL} = 480$ V, $V_{LL} = 600$ V, $V_{LL} = 2400$ V şebeke gerilimlerine karşılık sırasıyla $V_{DC} = 850$ V, $V_{DC} = 1000$ V, $V_{DC} = 4000$ V DC bara gerilimleri belirlenmiştir.

5.7.5 Adım 5

Şebeke tarafındaki simülasyon çalıştırılarak DC bara gerilimi, yarıiletken anahtarların akım ve gerilim değerleri, DC bara kapasitörünün değeri ve ripple akımları ve şebeke endüktansının hassas değeri belirlenmiştir. Bütün bu işlemler üç gerilim seviyesi için de adım 1' den adım 5' e kadar tekrar edilmiştir.

5.7.6 Adım 6

Generatör gerilimi kabaca, simülasyonda generatör modeli kullanılarak daha önceki adımlarda elde edilen DC bara gerilimini ve gereksinim duyulan aktif ve reaktif güç değerlerini karşılayacak şekilde tahmin edilmiştir. Bu amaçla basit bir model kurularak adım 1' dekine benzer bir yaklaşım ile generatör uç gerilimi belirlenmiştir. Bu modelde generatör ve doğrultucu arasında endüktans bulunmamaktadır.

5.7.7 Adım 7

Generatör geriliminin hassas bir şekilde ayarlanması ve yarıiletken akım değerlerinin belirlenmesi için simülasyon çalıştırılır. Bu işlem her bir 850 V, 1000 V ve 4000 V DC bara gerilimi için tekrarlanır.

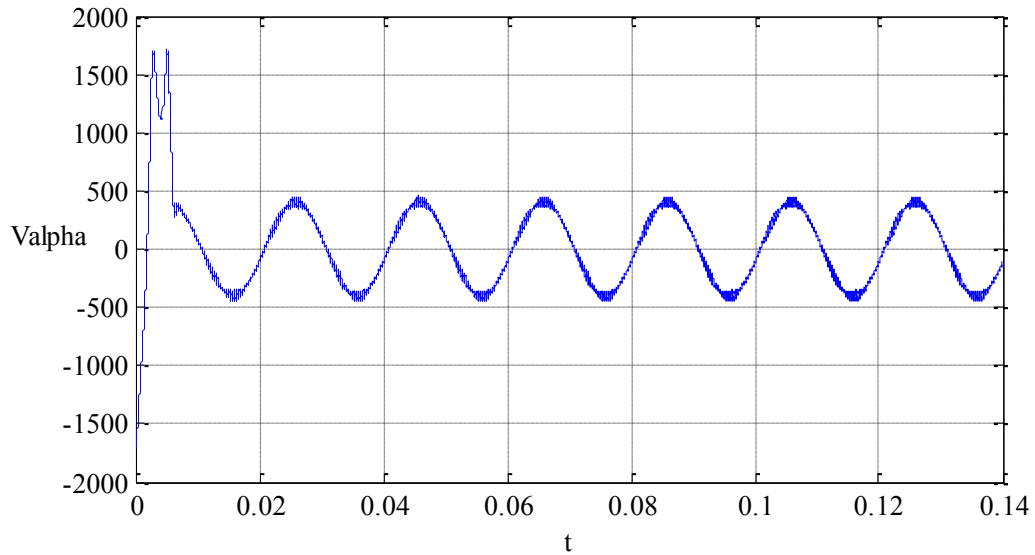
5.8 Simülasyon Sonuçları

Tüm gerilim seviyelerinin belirlenmesinden sonra, tüm sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İki güç elektroniği dönüştürücüsü birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bunlardan AC/DC dönüştürücü; generatör tarafında aktif ve reaktif güç kontrolünden sorumlu, DC/AC dönüştürücü ise şebeke tarafında DC baranın kontrolünden sorumludur. Tüm sistem üç ayrı seviyede incelenmiştir. Ek olarak, her bir seviyede DC/AC dönüştürücü kontrolünde kullanılan UVM ve HAK tekniği

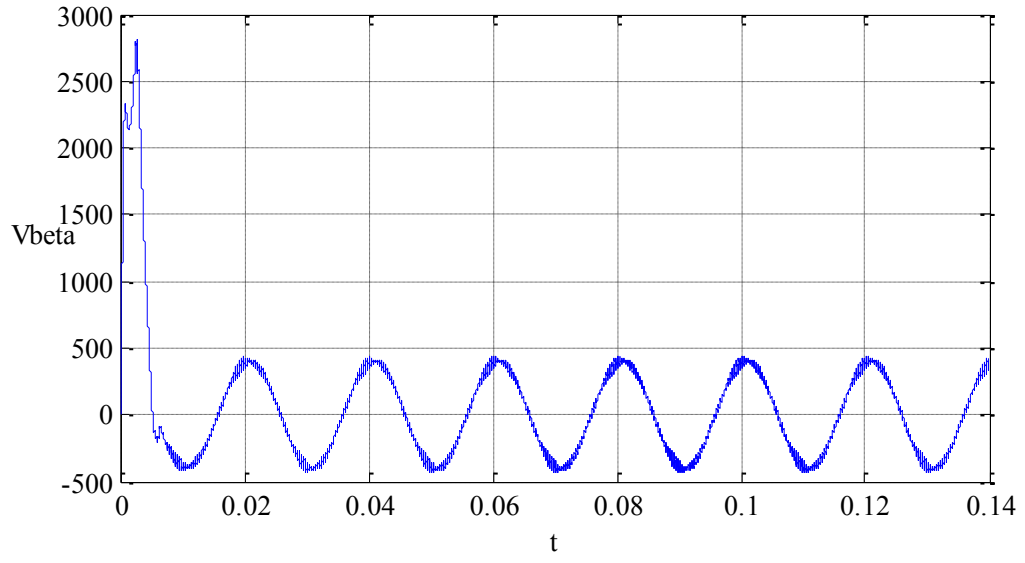
karşılaştırılmıştır. Son olarak; her bir seviye için, şebekede üç faz kısa devre arızası meydana geldiği varsayılarak sistemlerin bu arızaya tepkileri simülasyonlarla incelenmiştir.

5.8.1 Sistem 1

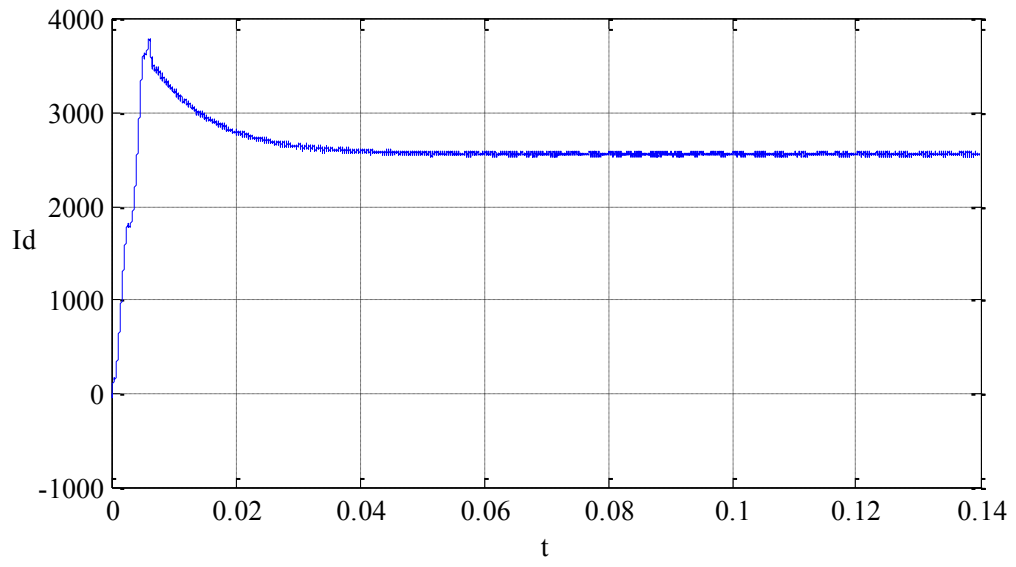
Bu sistemde 850 V DC bara ve 480 V faz-faz şebeke gerilimleri baz alınarak güç kontrolü yapılmıştır. Şebekeye 1,5 MW aktif güç ve 0 KVAR reaktif güç iletilmesi amaçlanmıştır. Bu şartlar altında sistemdeki değişkenler gözlenmiştir. Ayrıca aynı şartlar altında UVM ve HAK tekniklerinin THD ve anahtarlama frekansı açısından karşılaştırılması yapılmıştır.



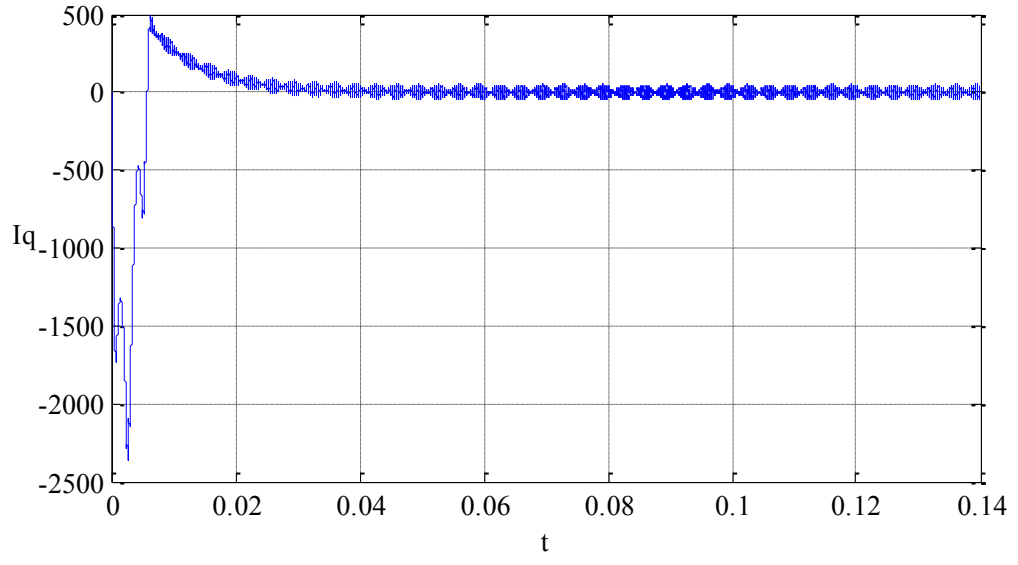
Şekil 5.2 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü



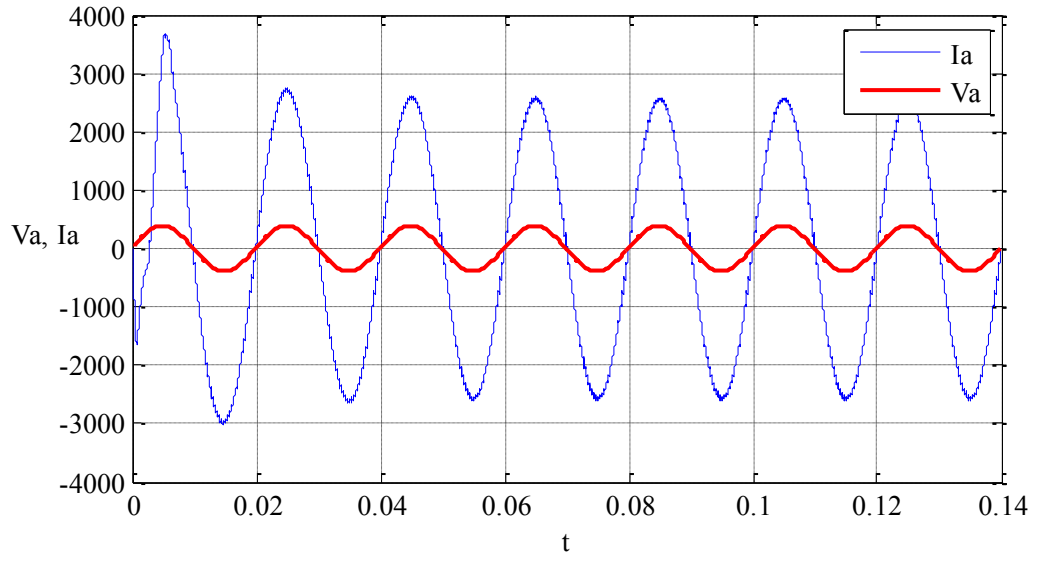
Şekil 5.3 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde V_{β} referans vektörü



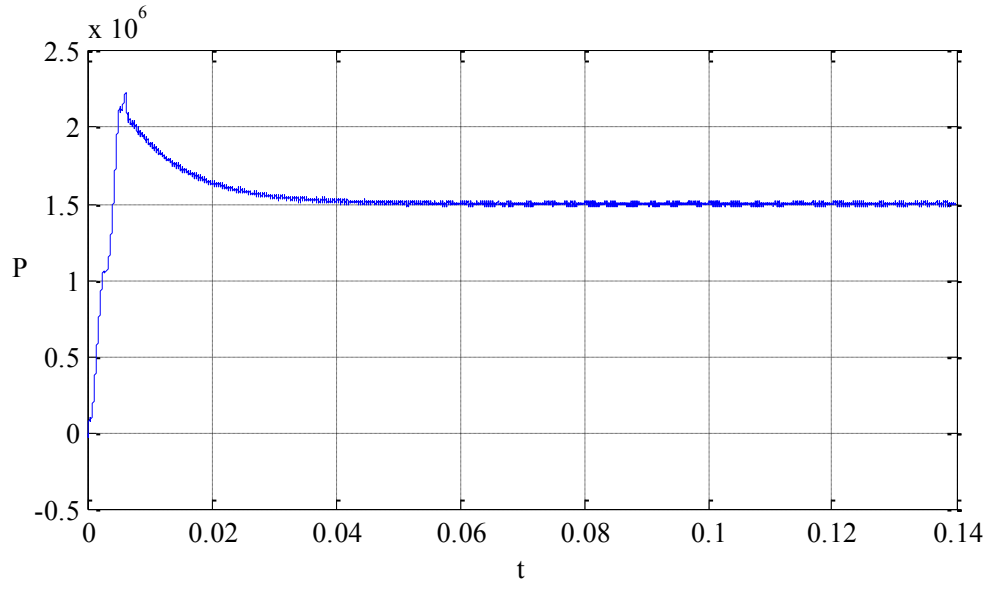
Şekil 5.4 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni



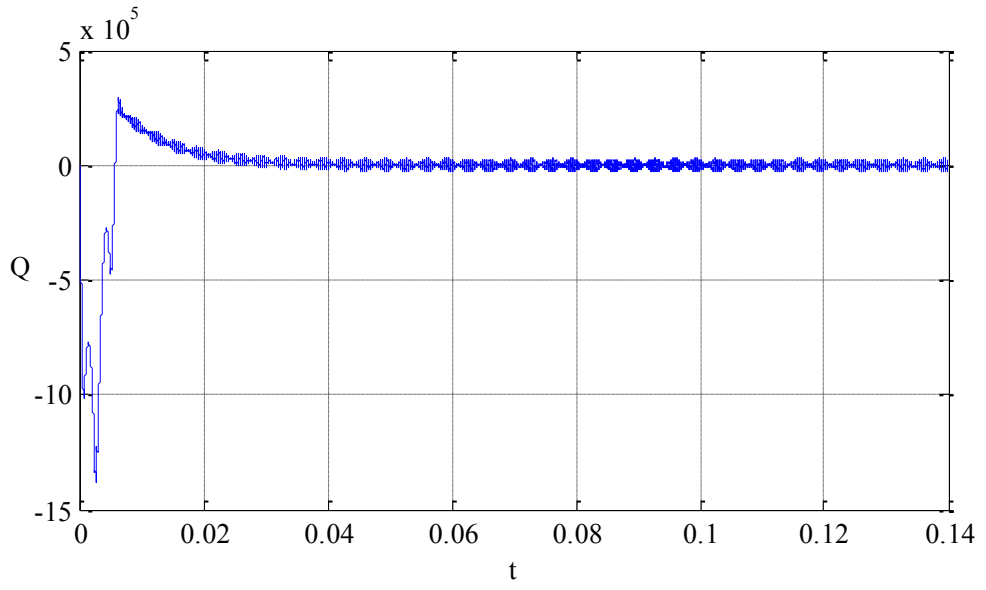
Şekil 5.5 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni



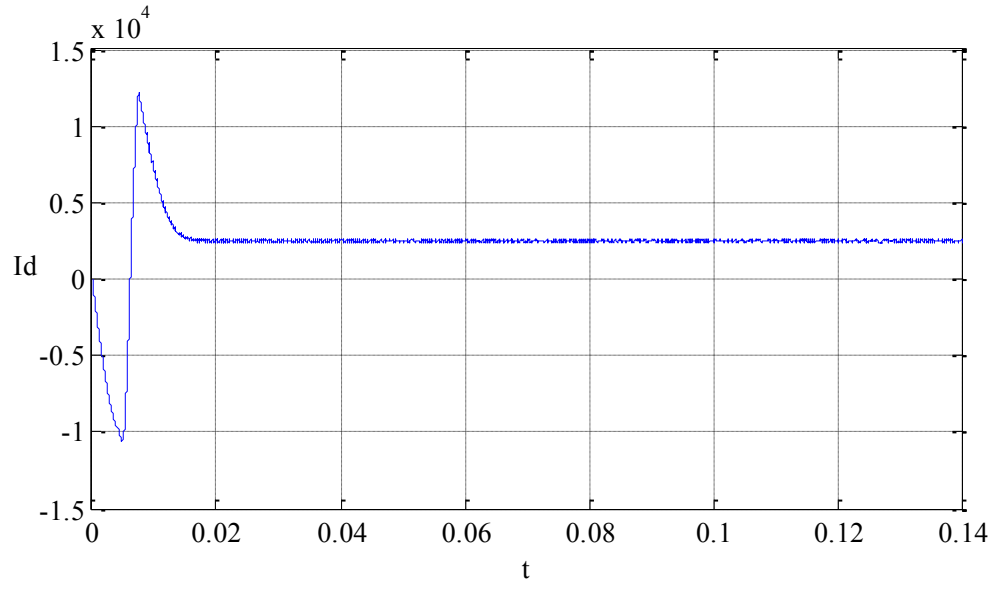
Şekil 5.6 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi



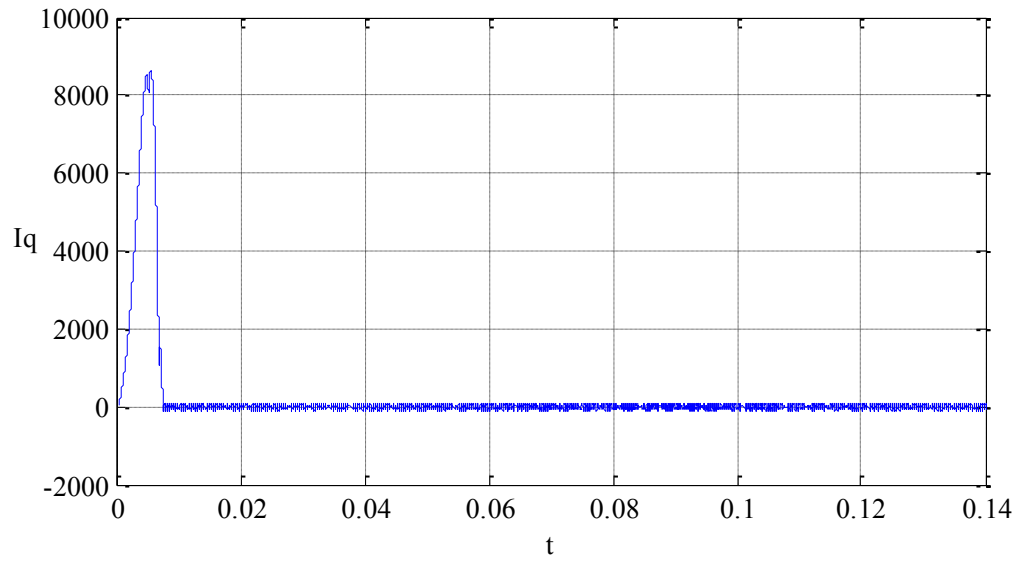
Şekil 5.7 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde aktif güç



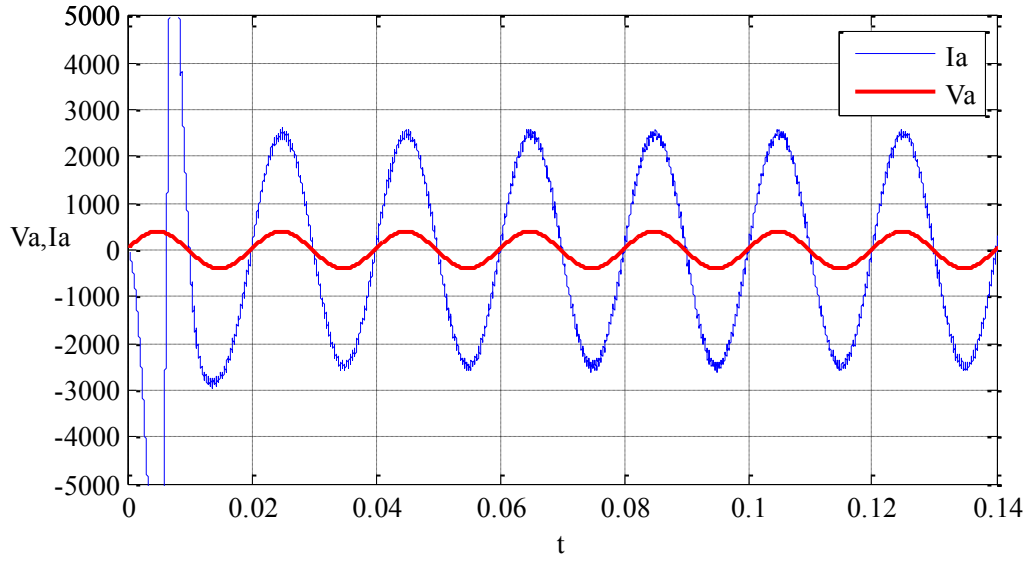
Şekil 5.8 Sistem 1 UVM kontrollü inverterde reaktif güç



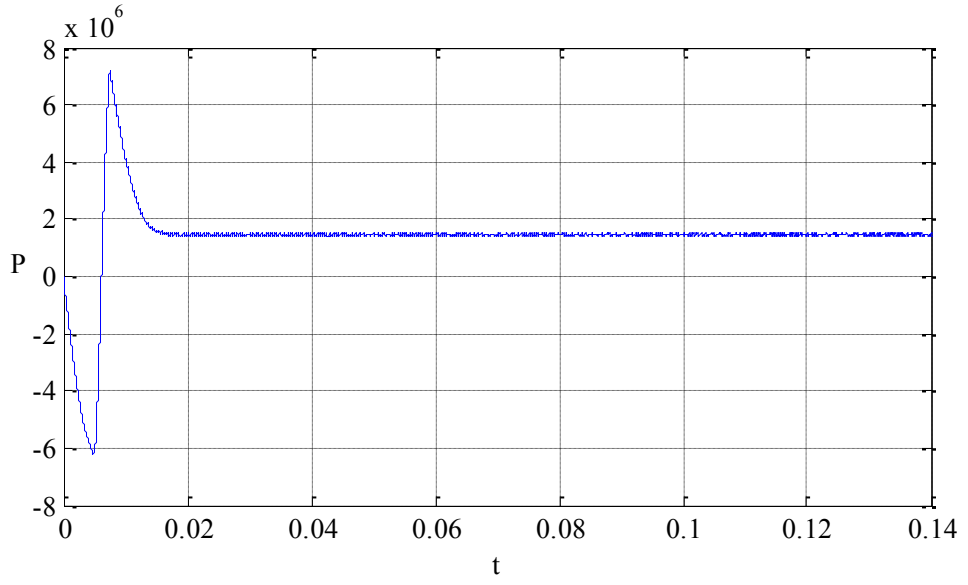
Şekil 5.9 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni



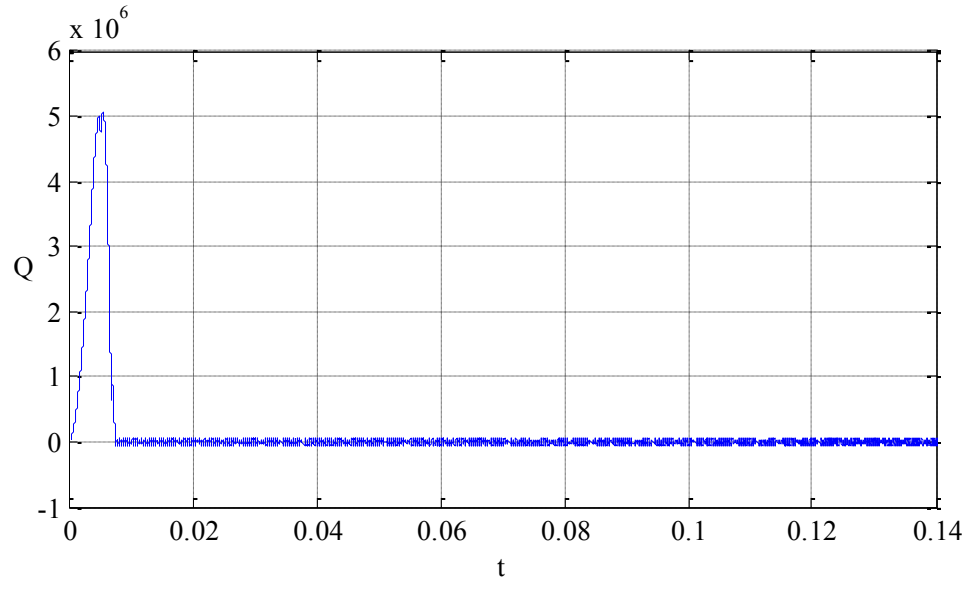
Şekil 5.10 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni



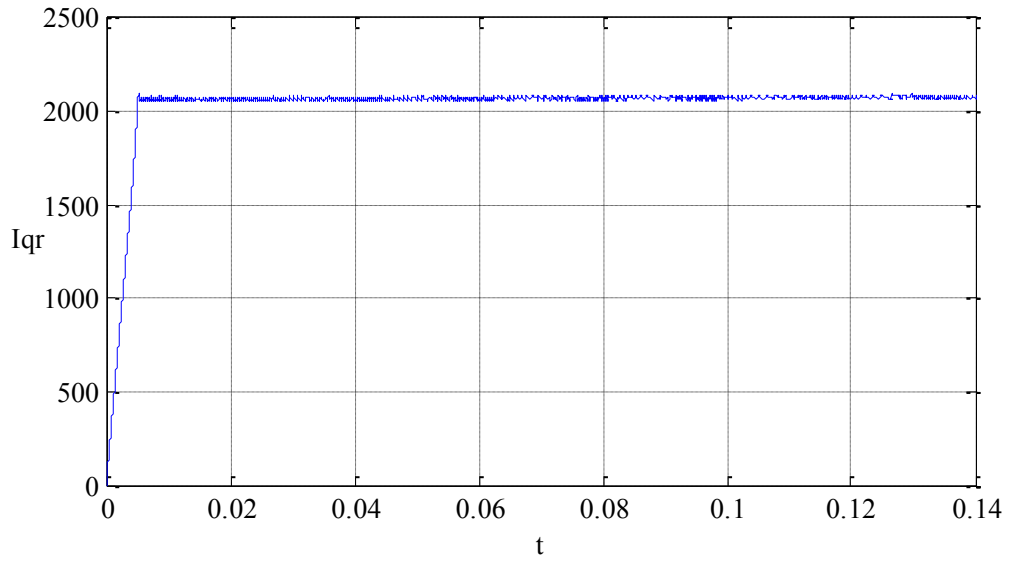
Şekil 5.11 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi



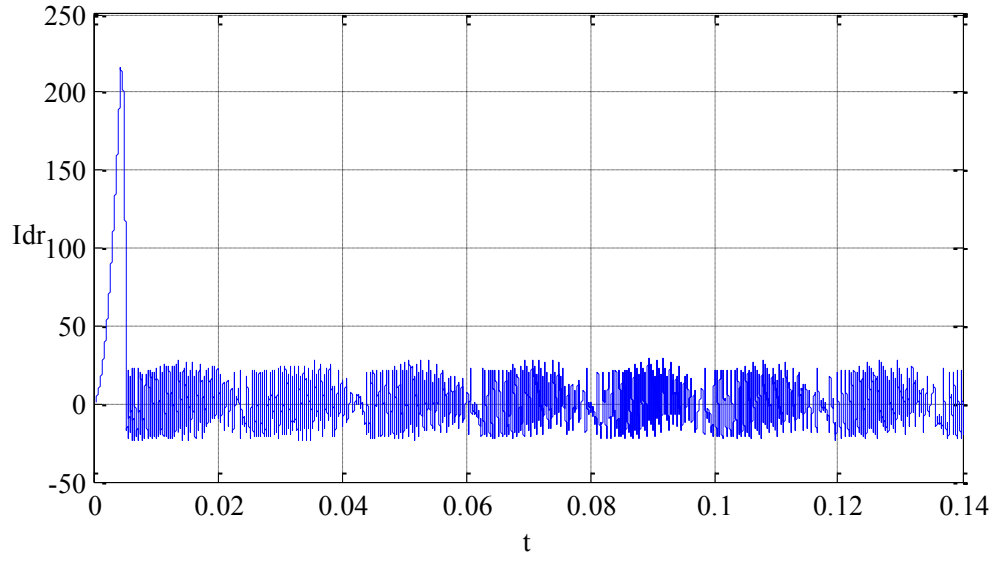
Şekil 5.12 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde aktif güç



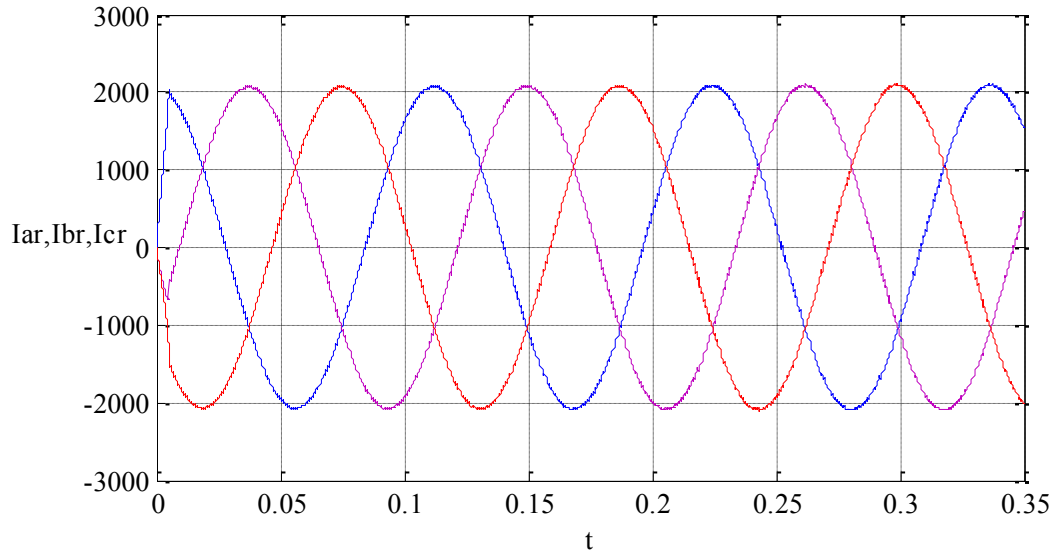
Şekil 5.13 Sistem 1 HAK kontrollü inverterde reaktif güç



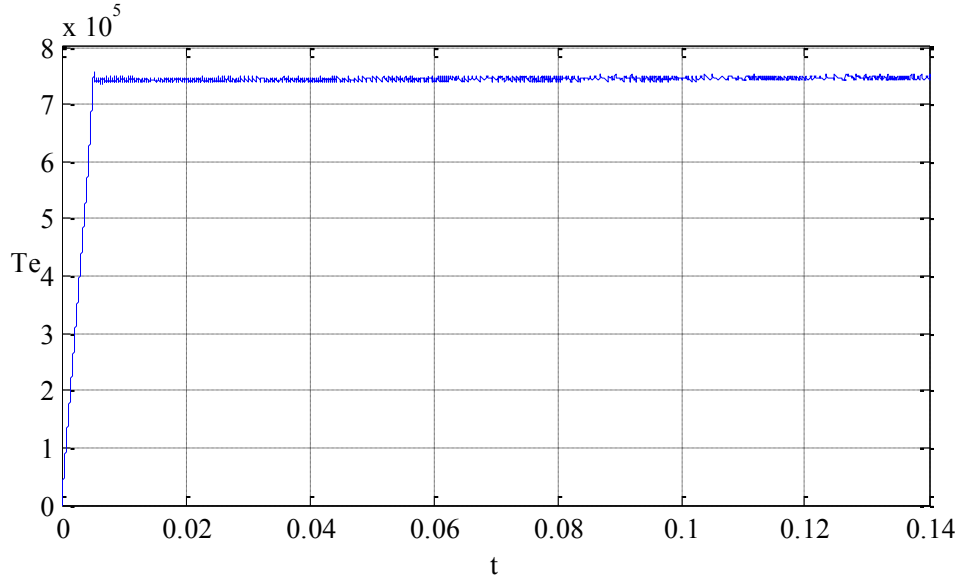
Şekil 5.14 Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni



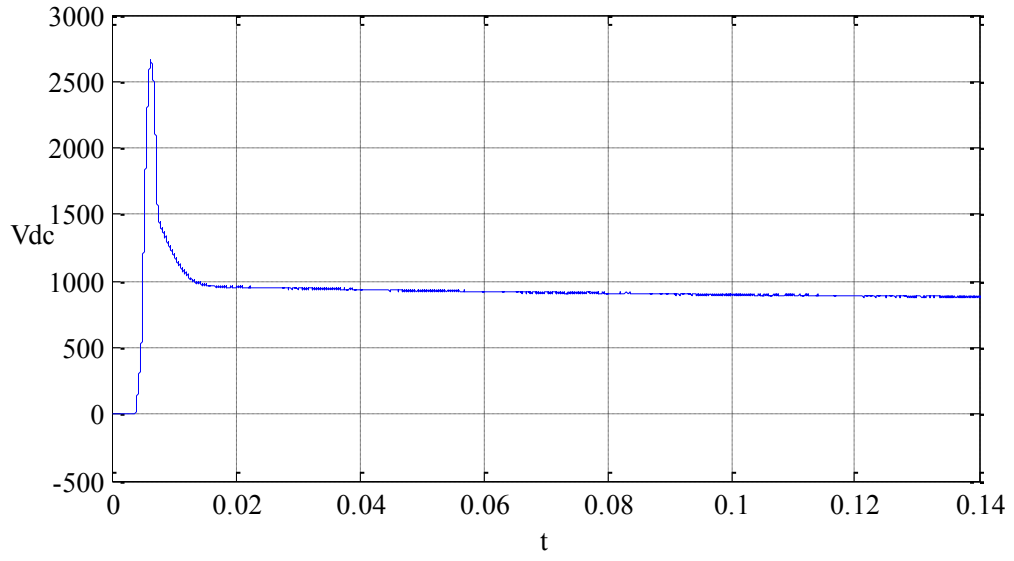
Şekil 5.15 Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni



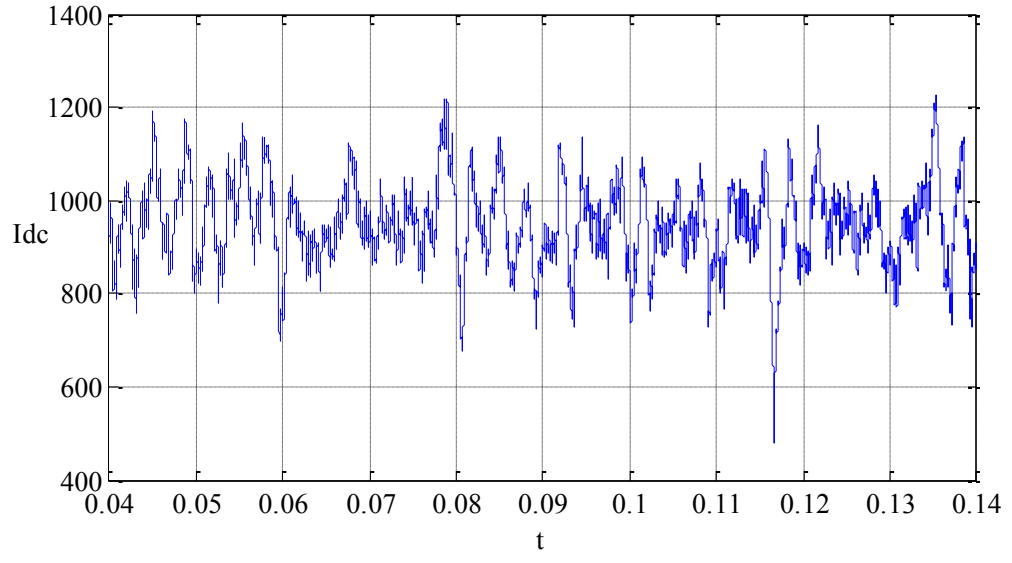
Şekil 5.16 Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları



Şekil 5.17 Sistem 1 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik moment



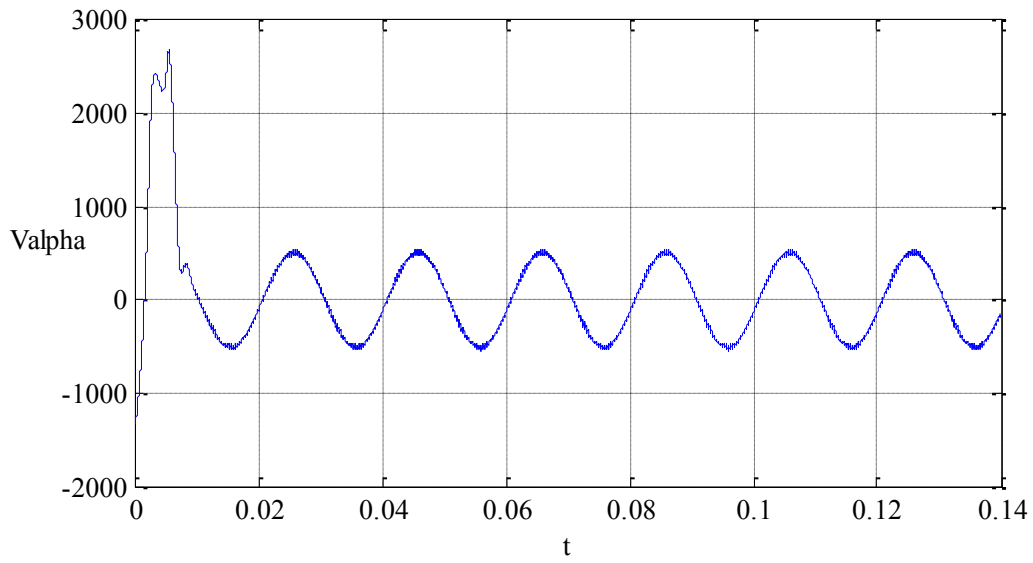
Şekil 5.18 Sistem 1 DC bara gerilimi



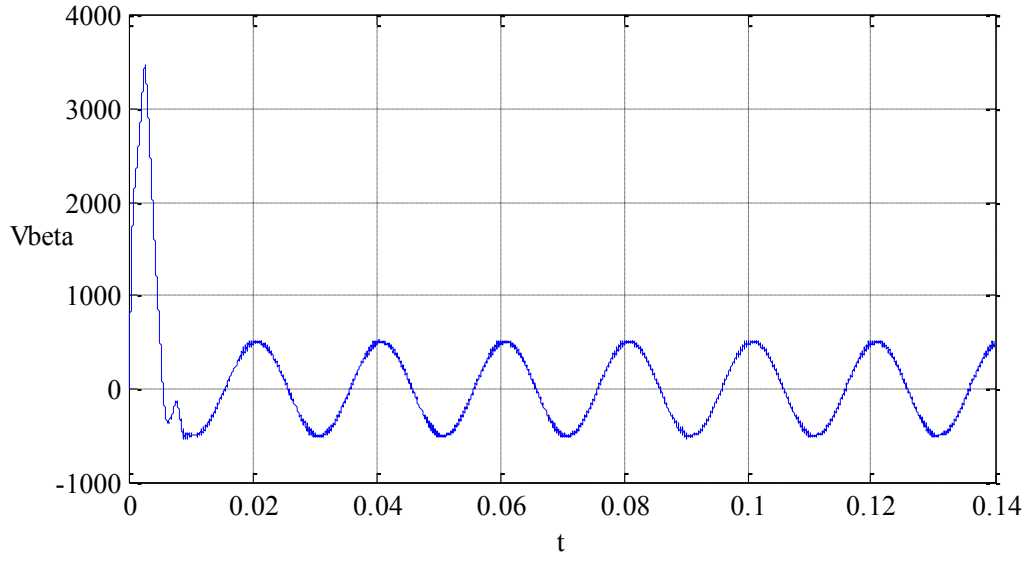
Şekil 5.19 Sistem 1 DC bara ripple akımı

5.8.2 Sistem 2

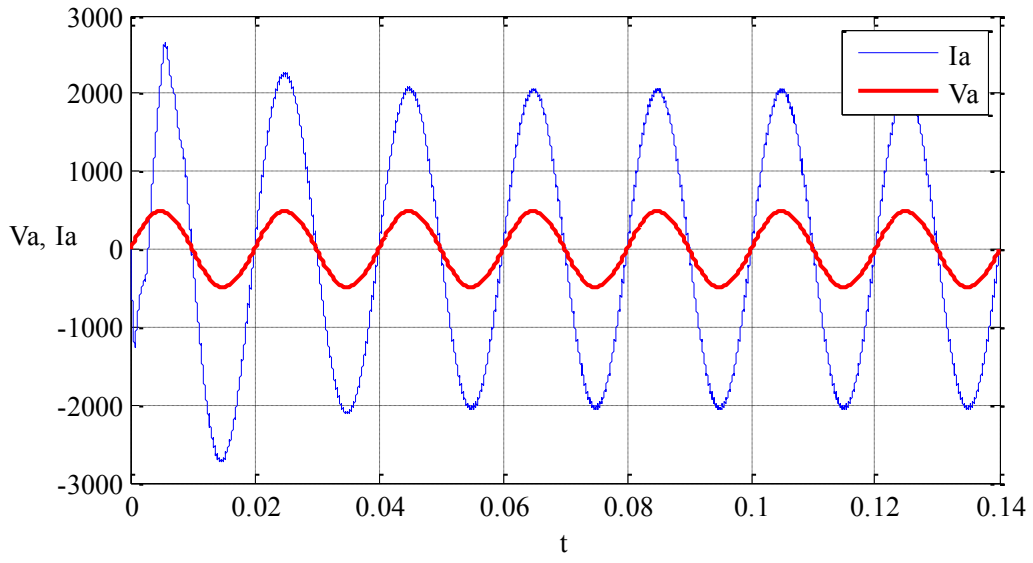
Bu sistemde 1000 V DC bara ve 600 V faz-faz şebeke gerilimleri baz alınarak güç kontrolü yapılmıştır. Şebekeye 1,5 MW aktif güç ve 0 KVAR reaktif güç iletilmesi amaçlanmıştır. Bu şartlar altında sistemdeki değişkenler gözlenmiştir. Ayrıca aynı şartlar altında UVM ve HAK tekniklerinin THD ve anahtarlama frekansı açısından karşılaştırılması yapılmıştır.



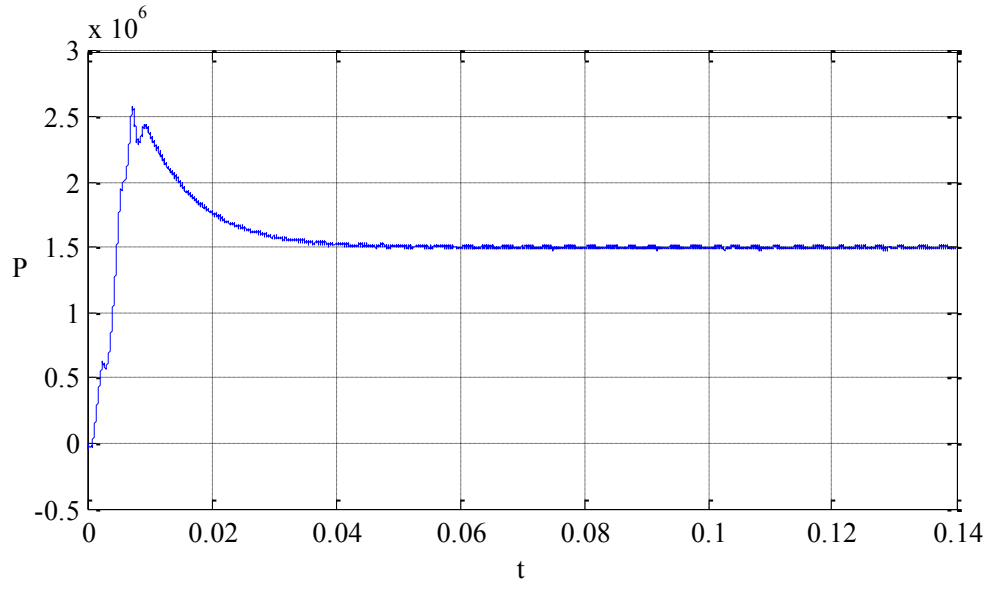
Şekil 5.20 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü



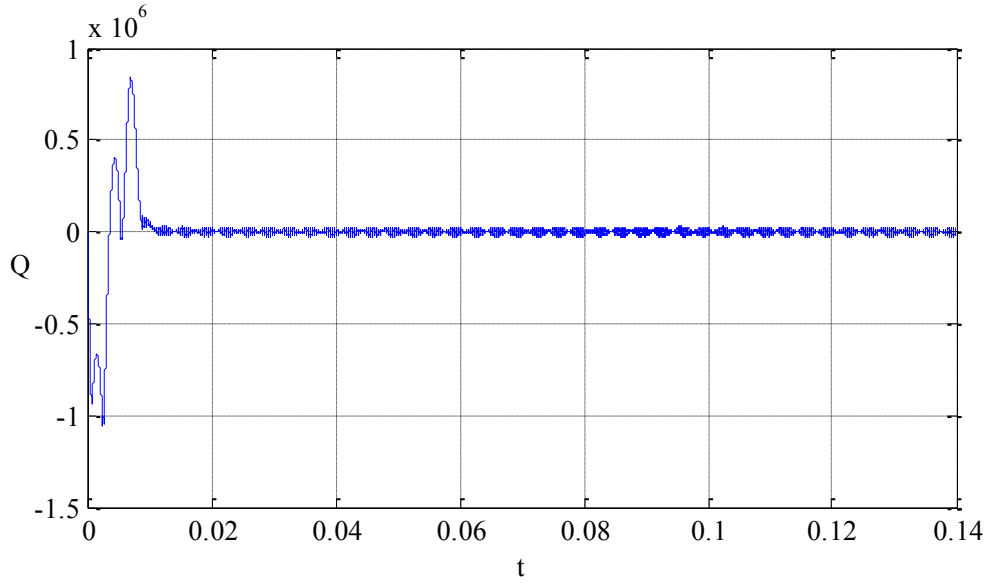
Şekil 5.21 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde V_{β} referans vektörü



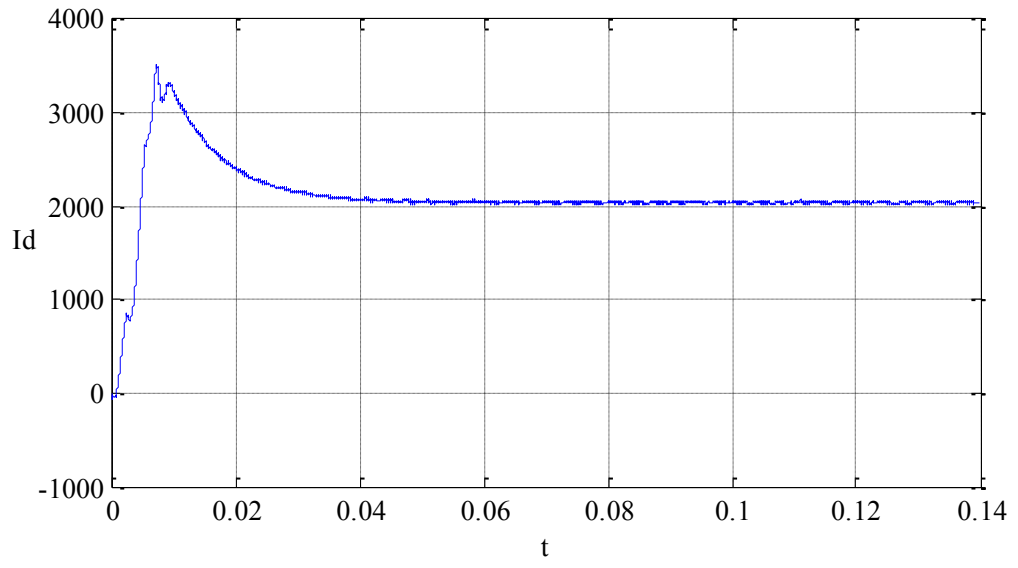
Şekil 5.22 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akım ve gerilimi



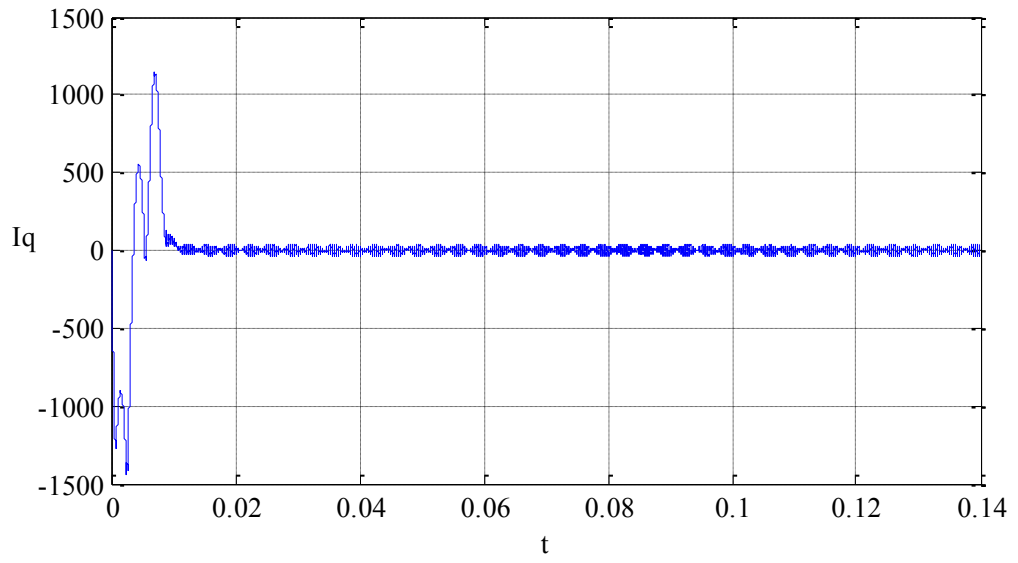
Şekil 5.23 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde aktif güç



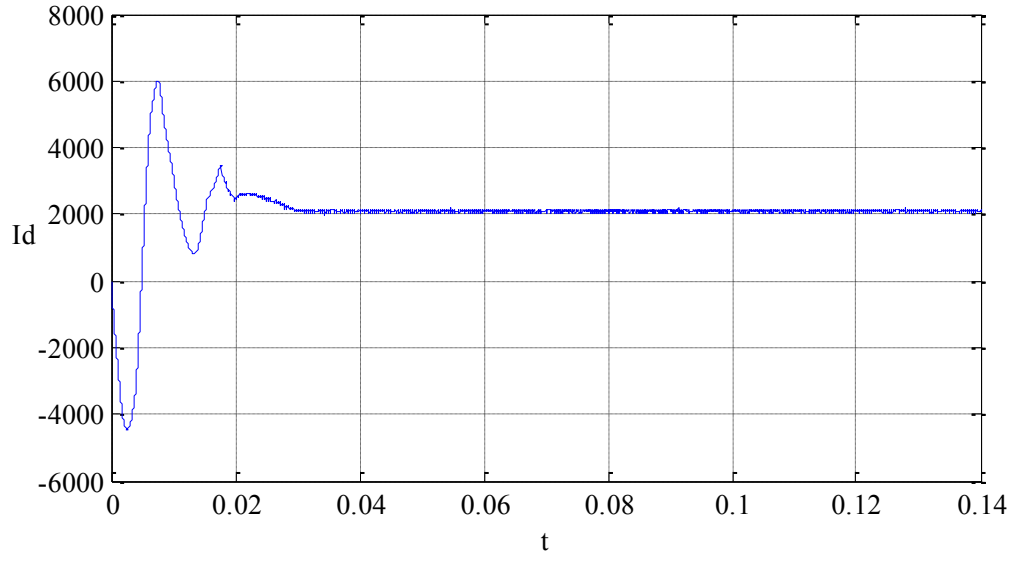
Şekil 5.24 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde reaktif güç



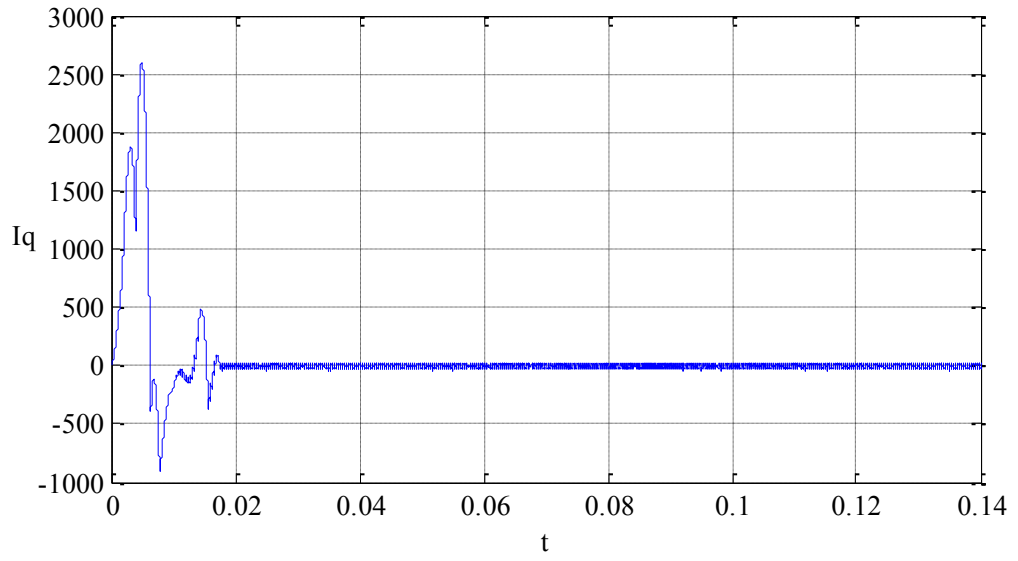
Şekil 5.25 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni



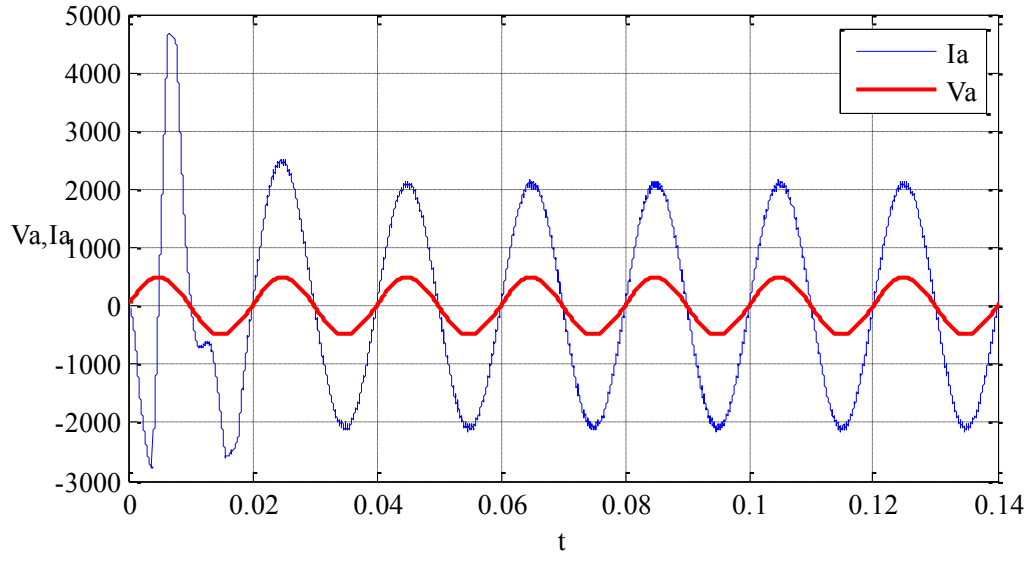
Şekil 5.26 Sistem 2 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni



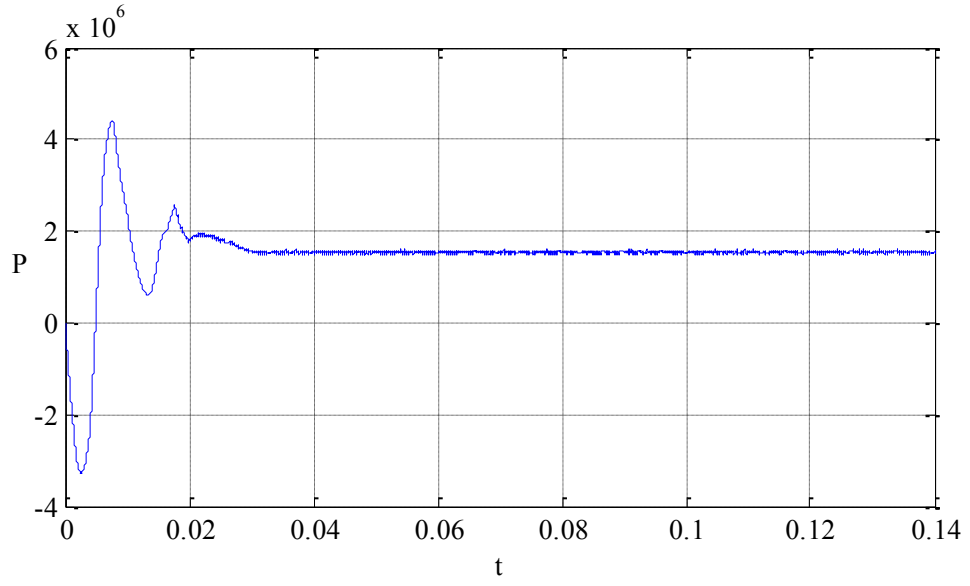
Şekil 5.27 Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni



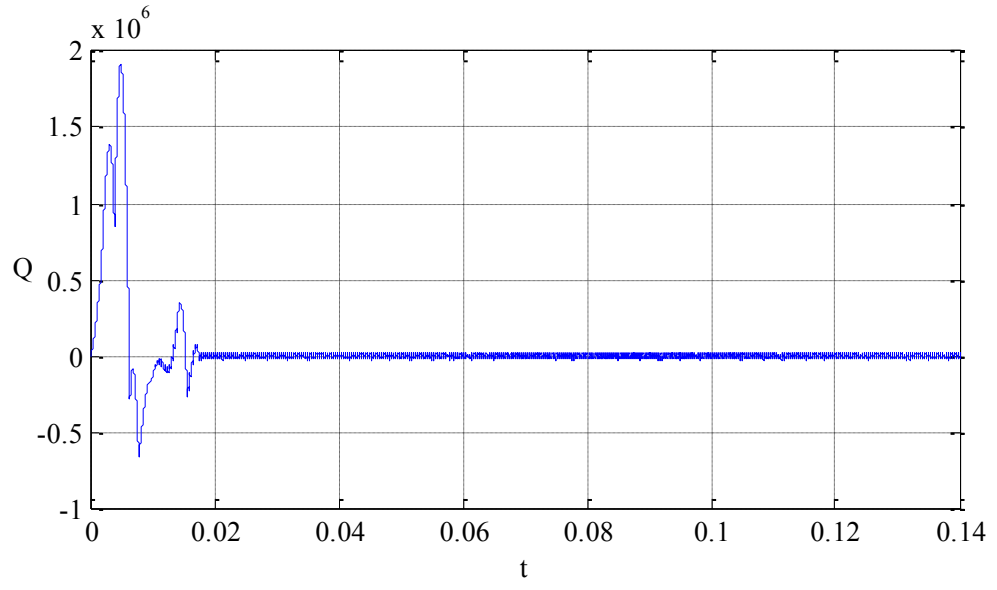
Şekil 5.28 Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni



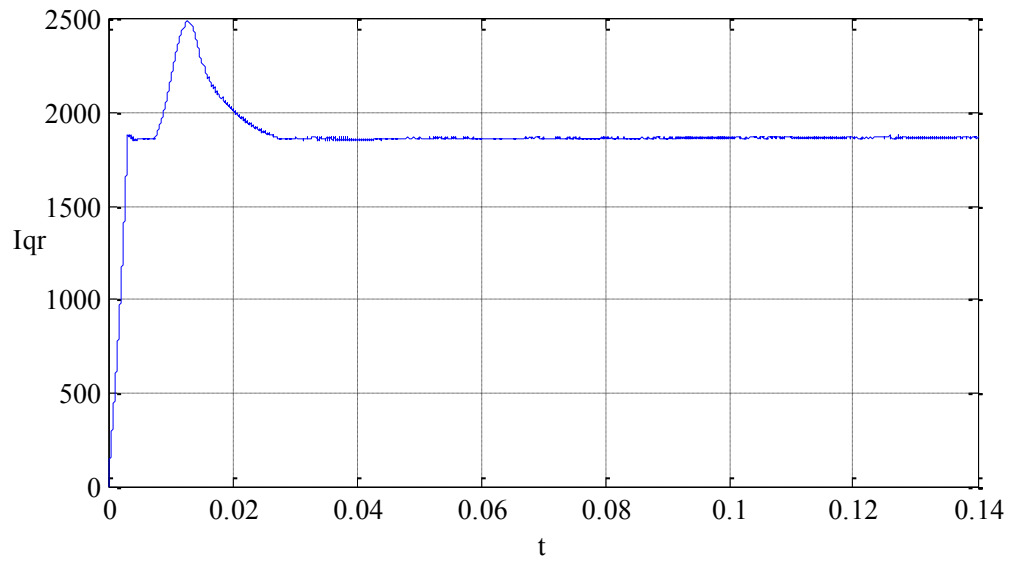
Şekil 5.29 Sistem 2 HAK kontrollü inverterde şebeke akım ve gerilimi



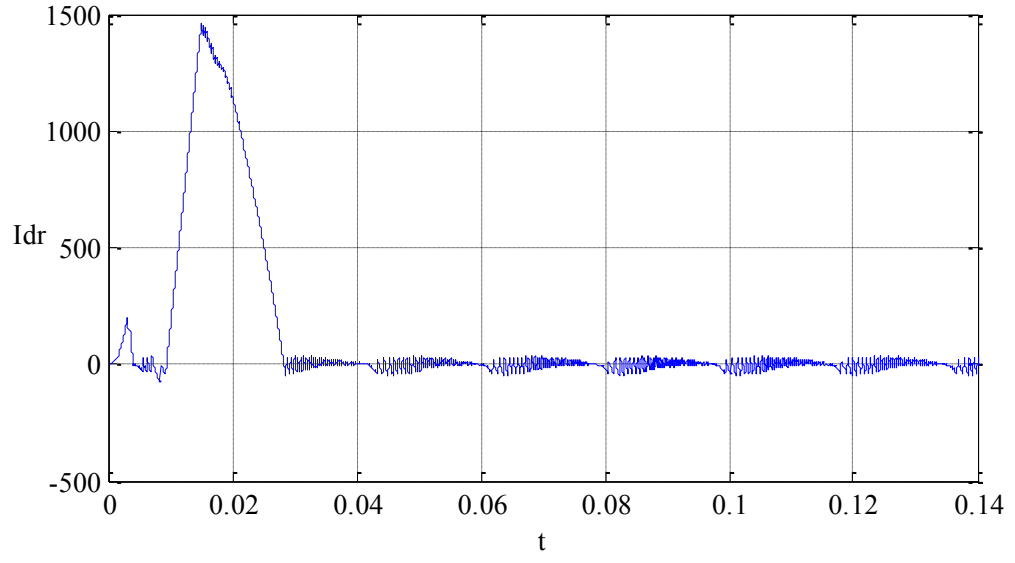
Şekil 5.30 Sistem 2 HAK kontrollü inverterde aktif güç



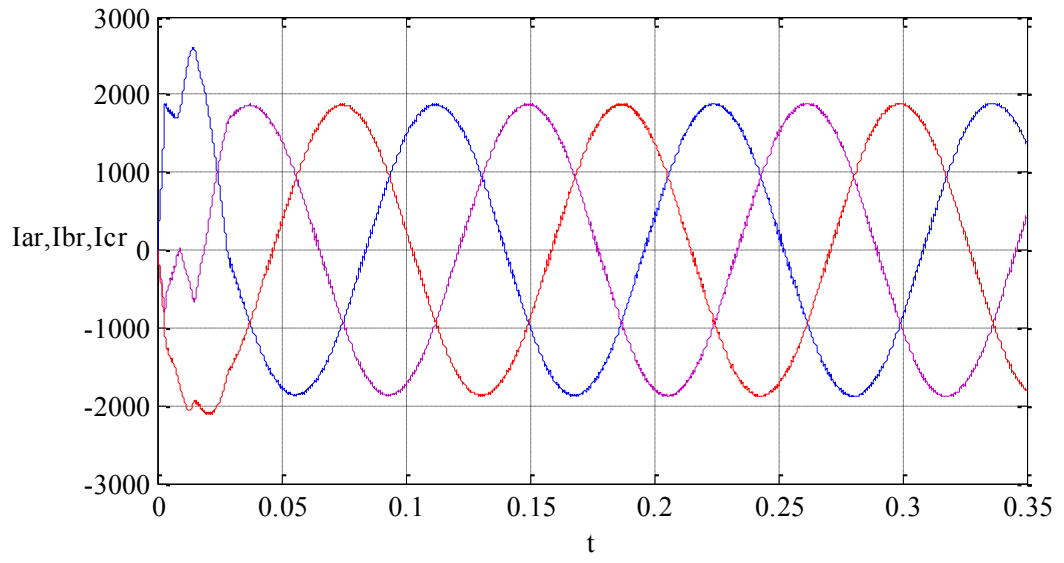
Şekil 5.31 Sistem 2 HAK kontrollü inverterde reaktif güç



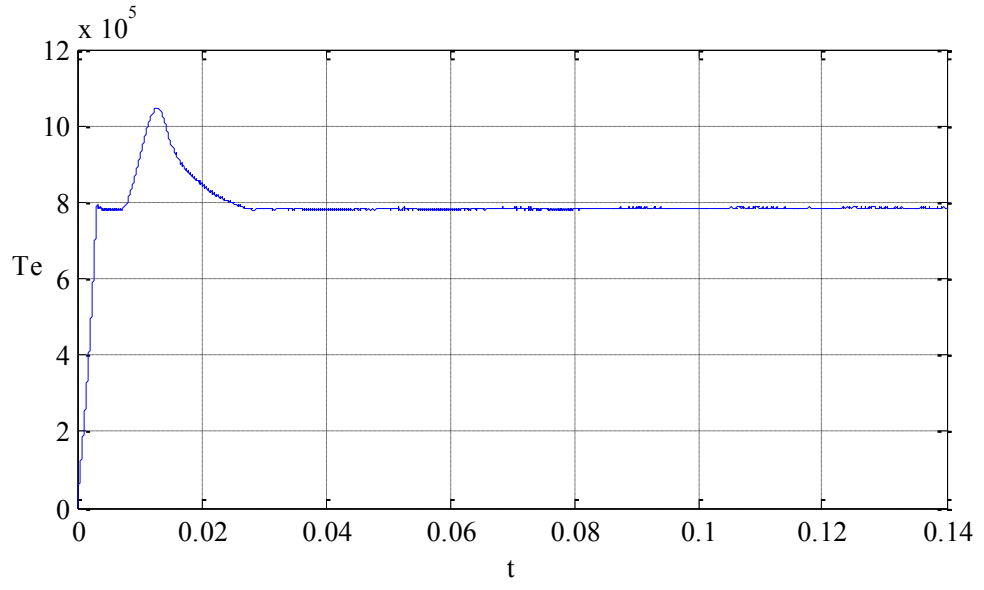
Şekil 5.32 Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni



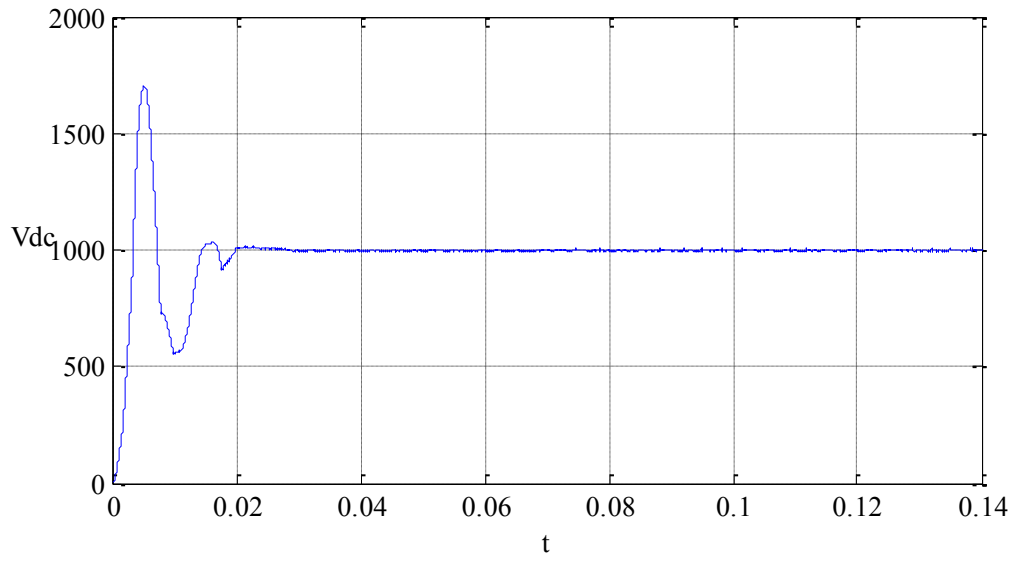
Şekil 5.33 Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni



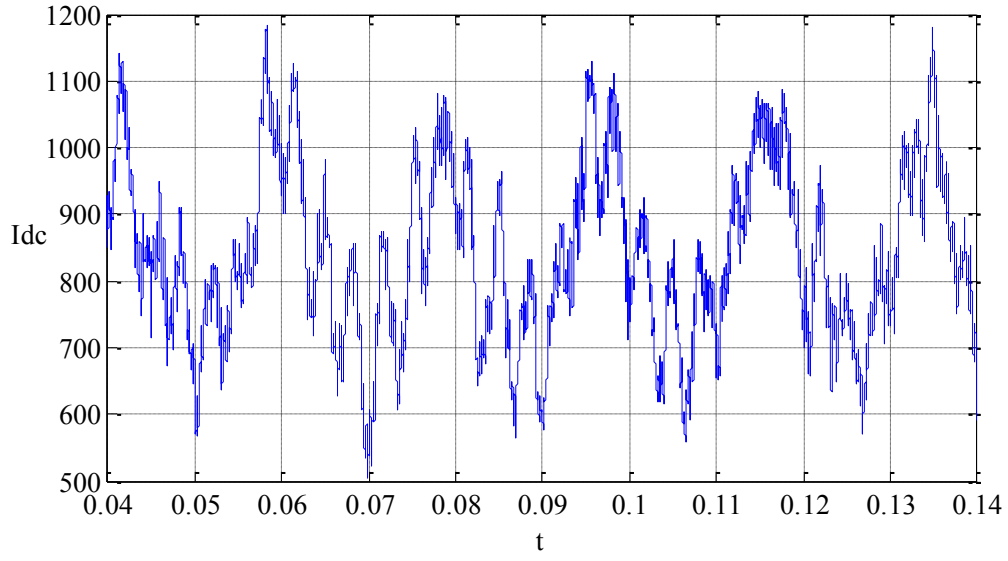
Şekil 5.34 Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları



Şekil 5.35 Sistem 2 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik moment



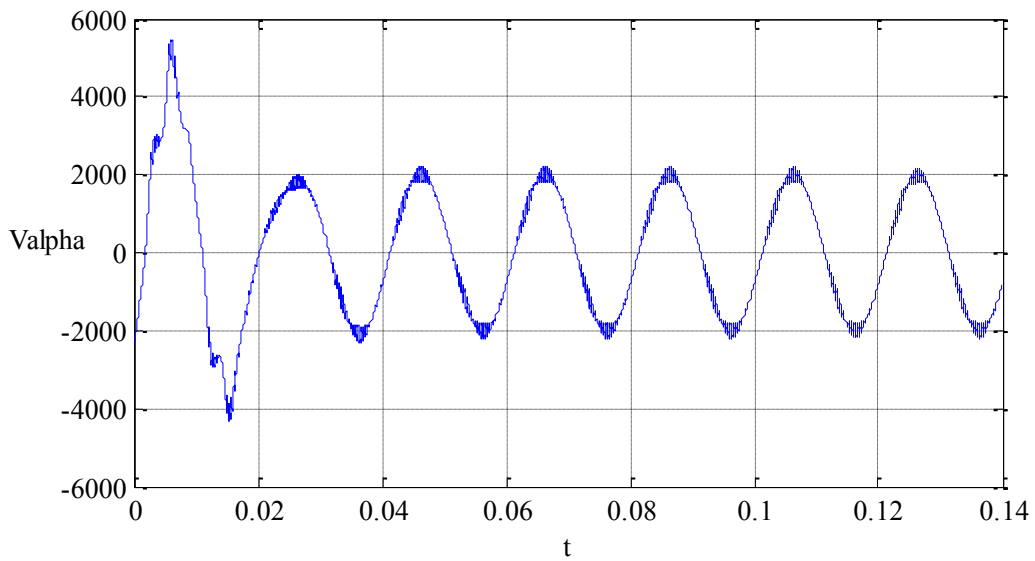
Şekil 5.36 Sistem 2 DC bara gerilimi



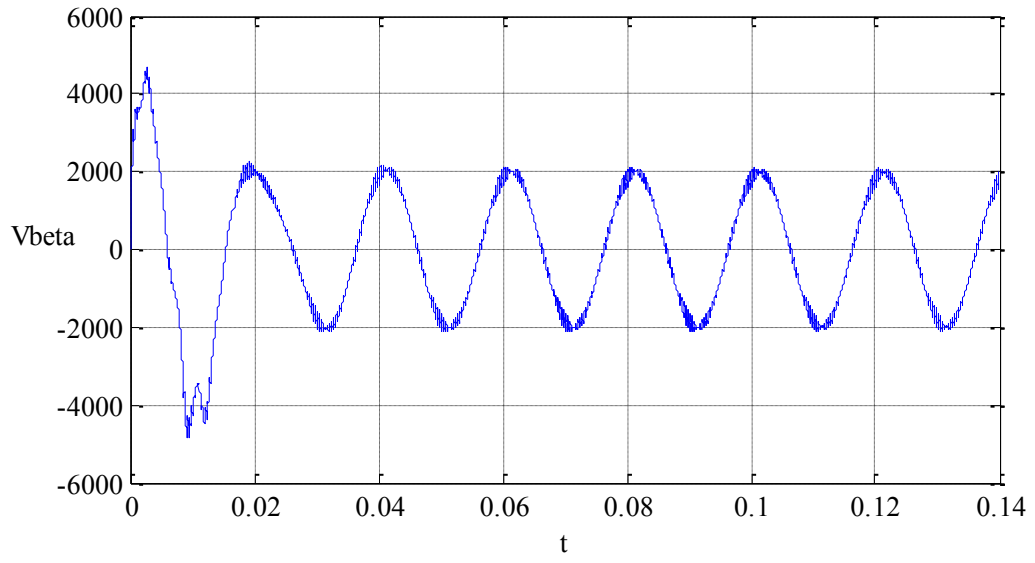
Şekil 5.37 Sistem 2 DC bara ripple akımı

5.8.3 Sistem 3

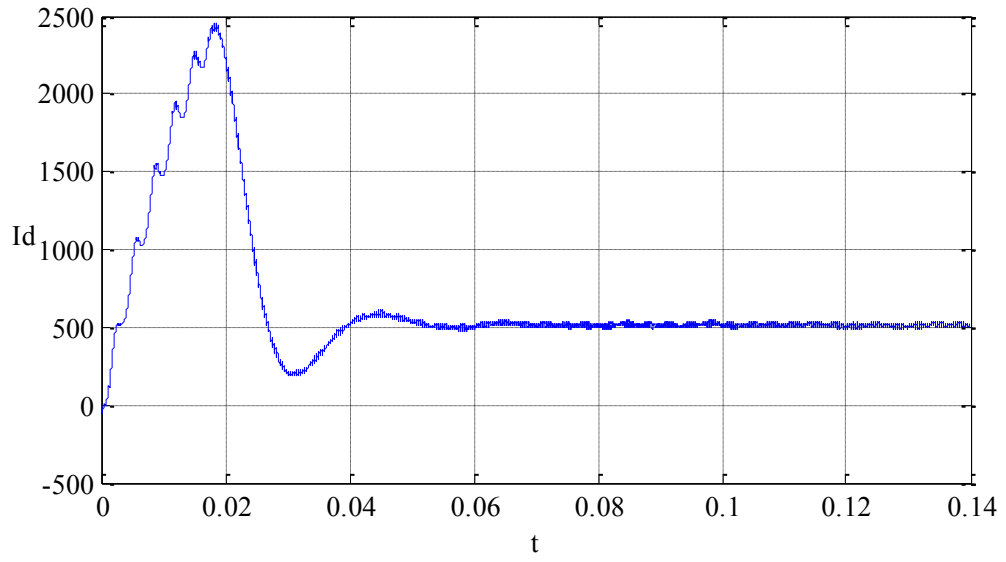
Bu sistemde 4000 V DC bara ve 2400 V faz-faz şebeke gerilimleri baz alınarak güç kontrolü yapılmıştır. Şebekeye 1,5 MW aktif güç ve 0 KVAR reaktif güç iletilmesi amaçlanmıştır. Bu şartlar altında sistemdeki değişkenler gözlenmiştir. Ayrıca aynı şartlar altında UVM ve HAK tekniklerinin THD ve anahtarlama frekansı açısından karşılaştırılması yapılmıştır.



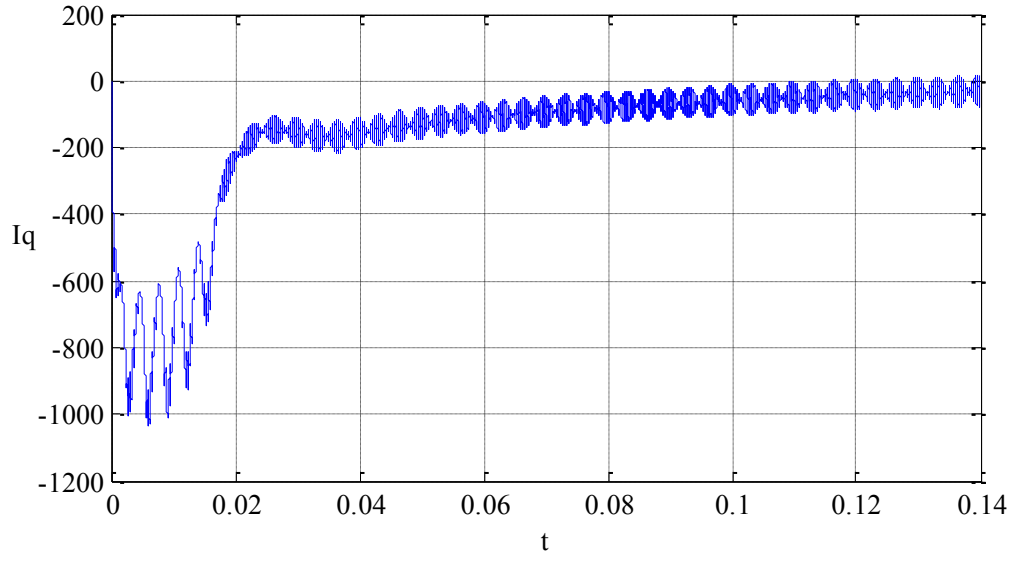
Şekil 5.38 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde V_α referans vektörü



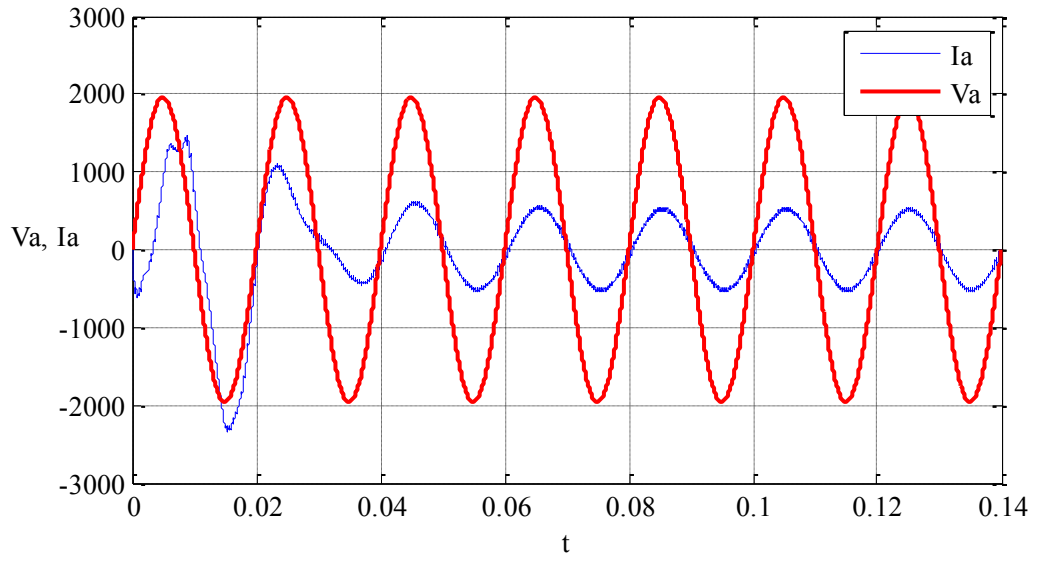
Şekil 5.39 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde V_{β} referans vektörü



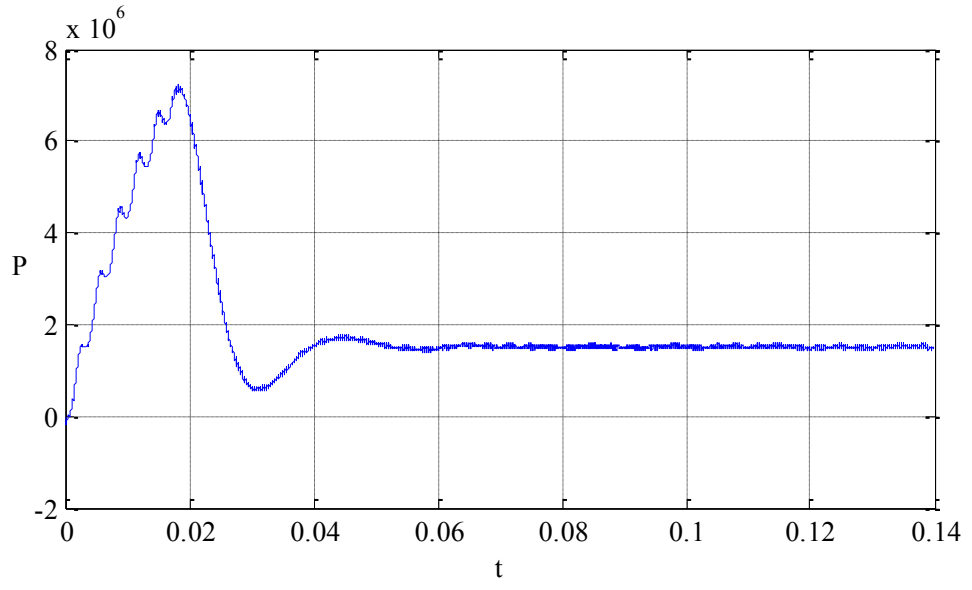
Şekil 5.40 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı aktif bileşeni



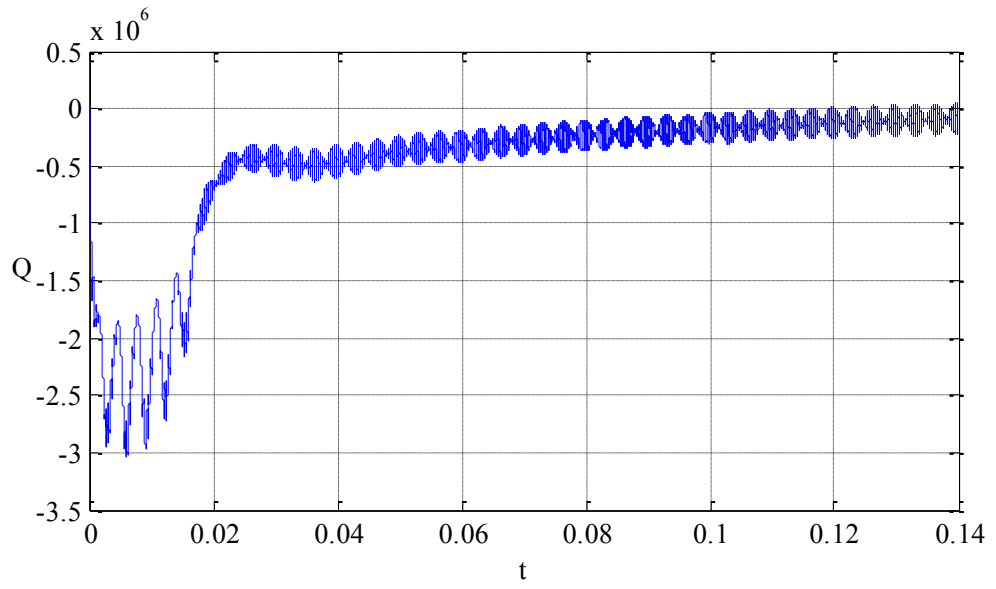
Şekil 5.41 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı reaktif bileşeni



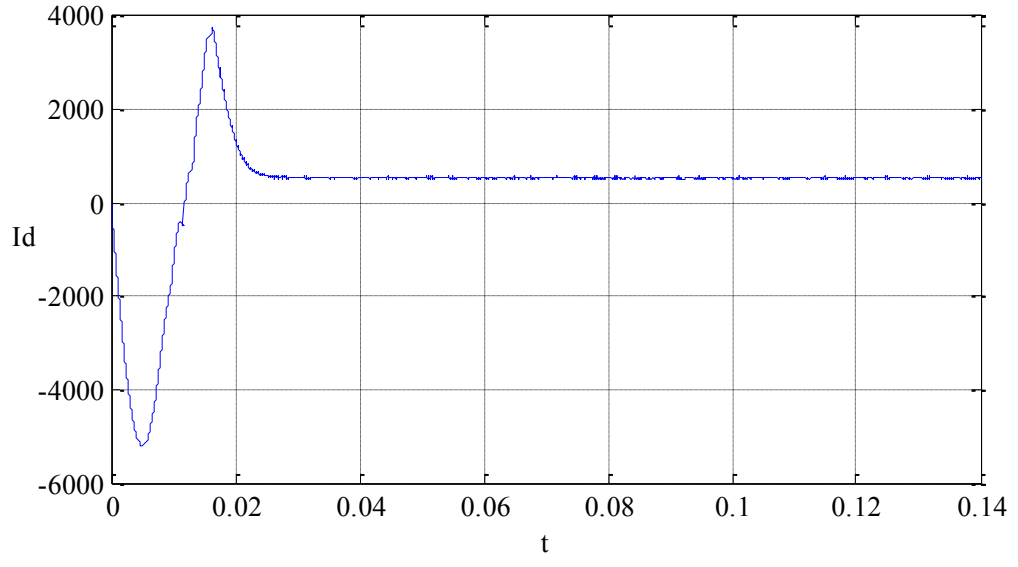
Şekil 5.42 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde şebeke akımı ve gerilimi



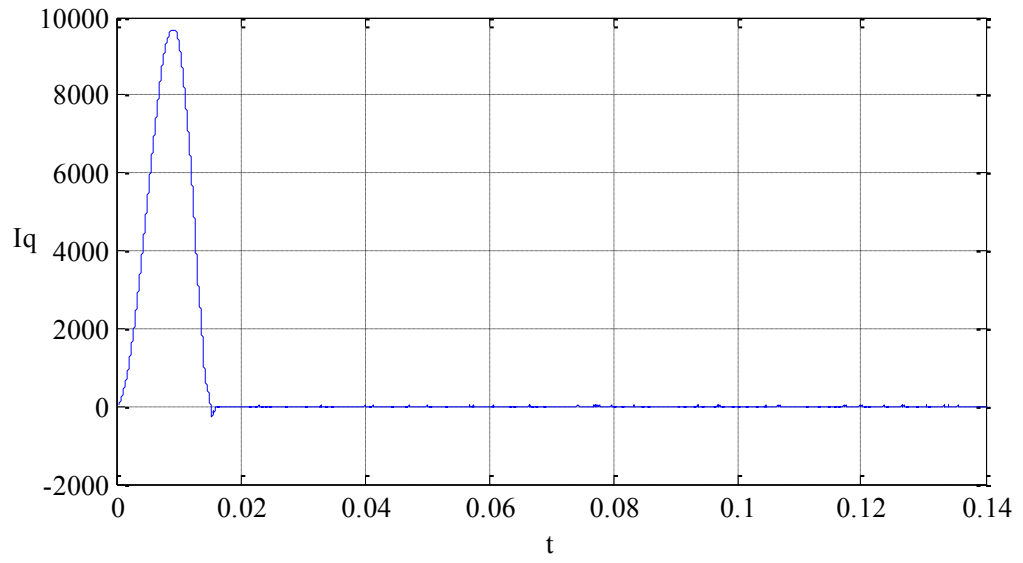
Şekil 5.43 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde aktif güç



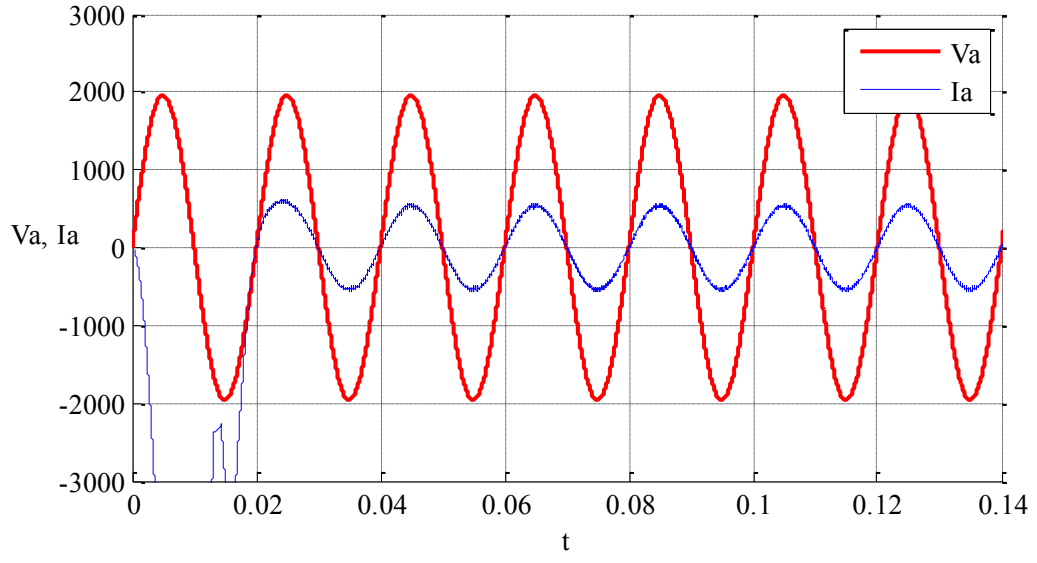
Şekil 5.44 Sistem 3 UVM kontrollü inverterde reaktif güç



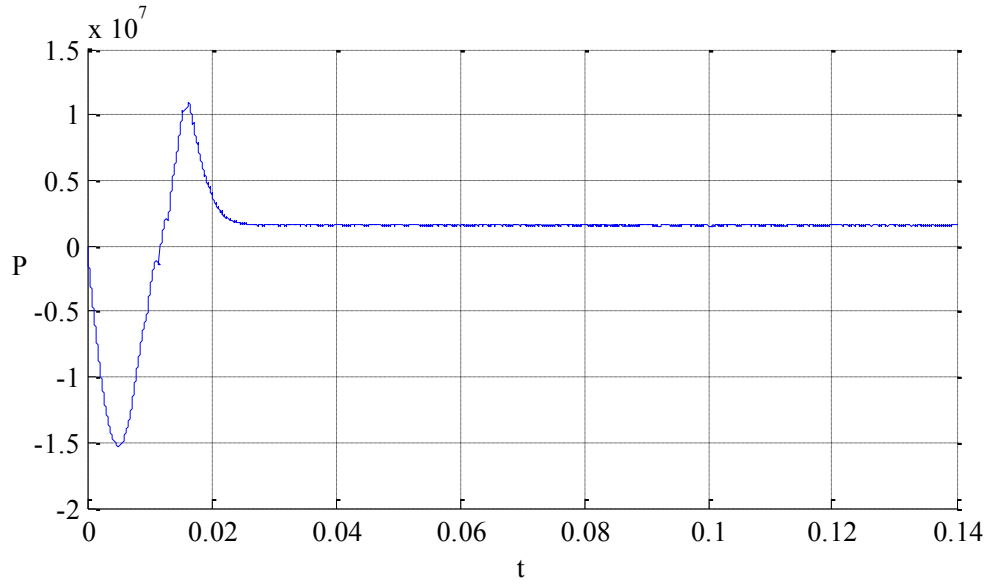
Şekil 5.45 Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı aktif bileşeni



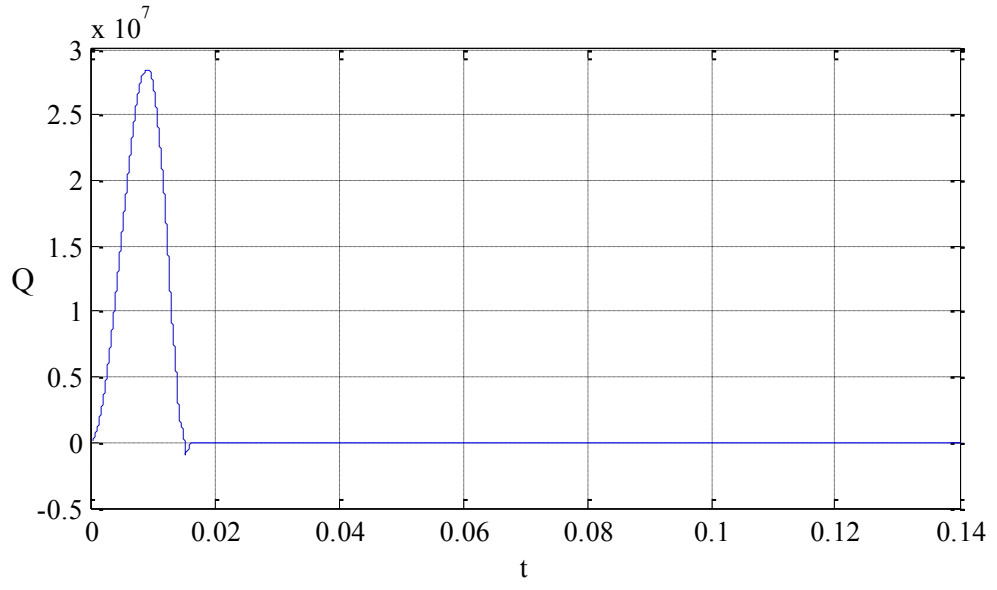
Şekil 5.46 Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı reaktif bileşeni



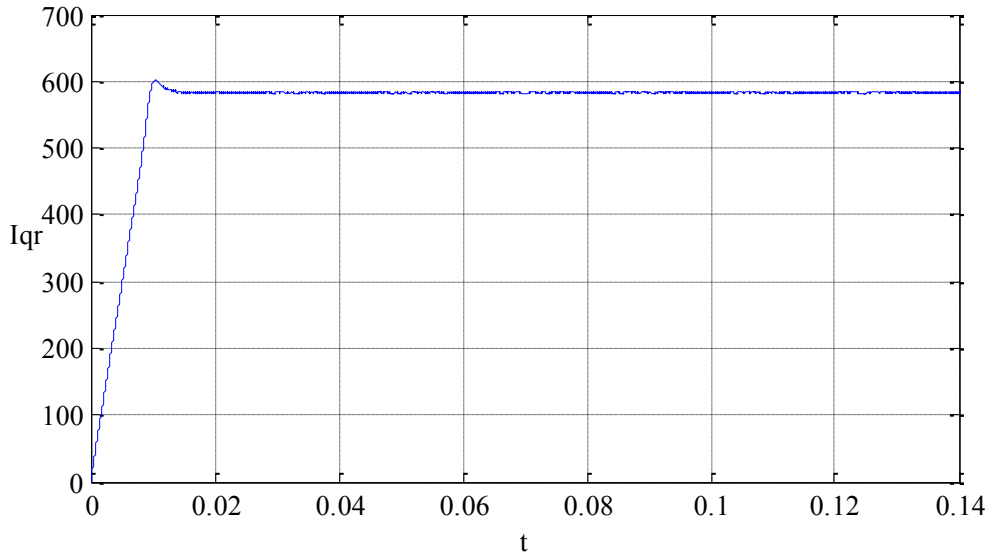
Şekil 5.47 Sistem 3 HAK kontrollü inverterde şebek akımı ve gerilimi



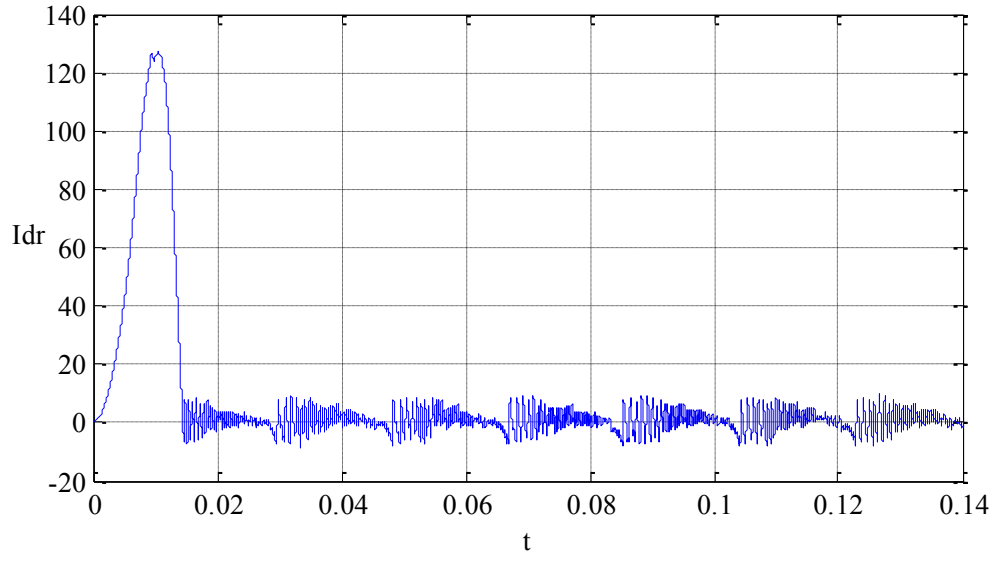
Şekil 5.48 Sistem 3 HAK kontrollü inverterde aktif güç



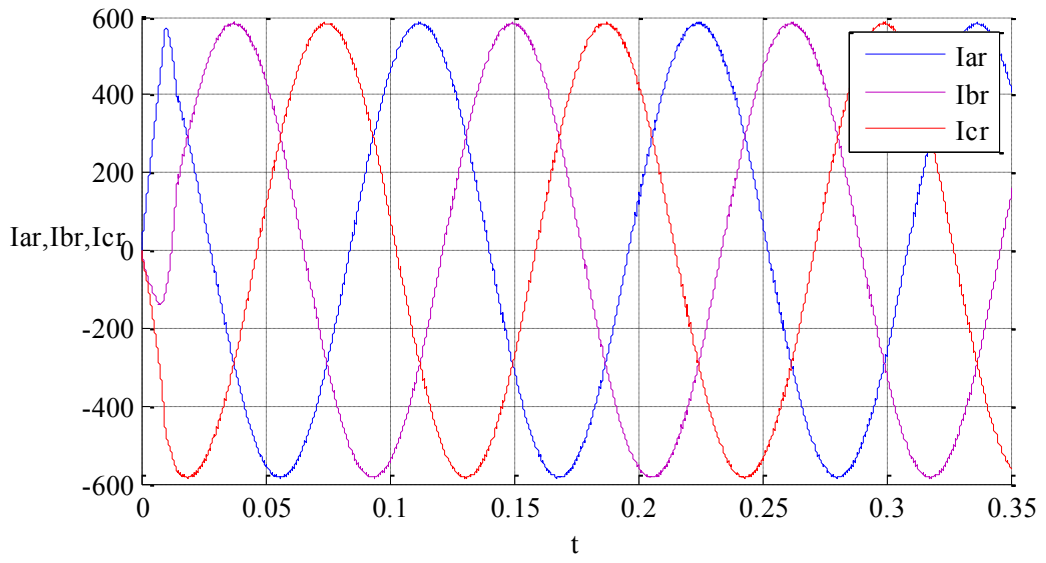
Şekil 5.49 Sistem 3 HAK kontrollü inverterde reaktif güç



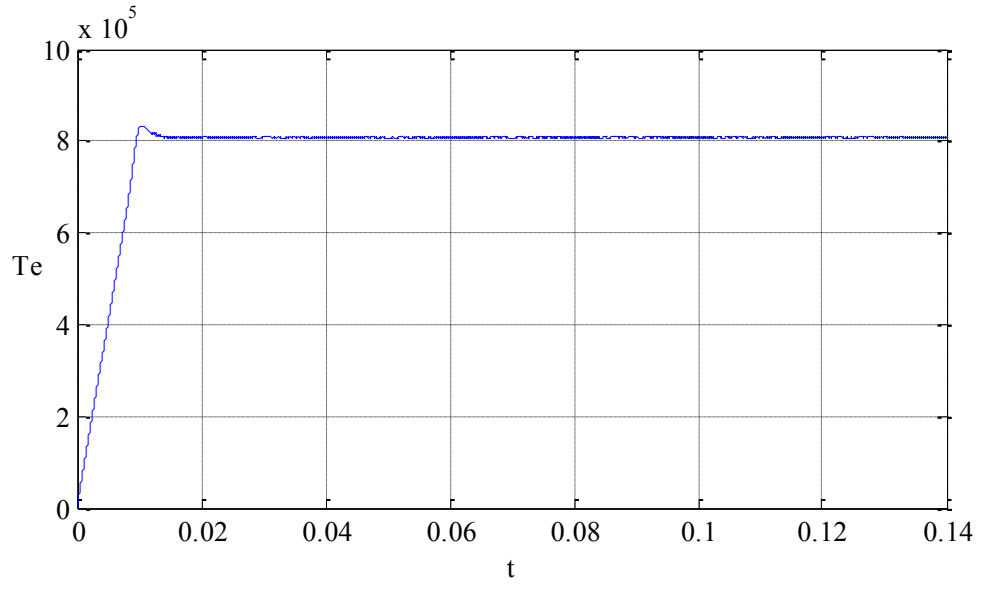
Şekil 5.50 Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı moment bileşeni



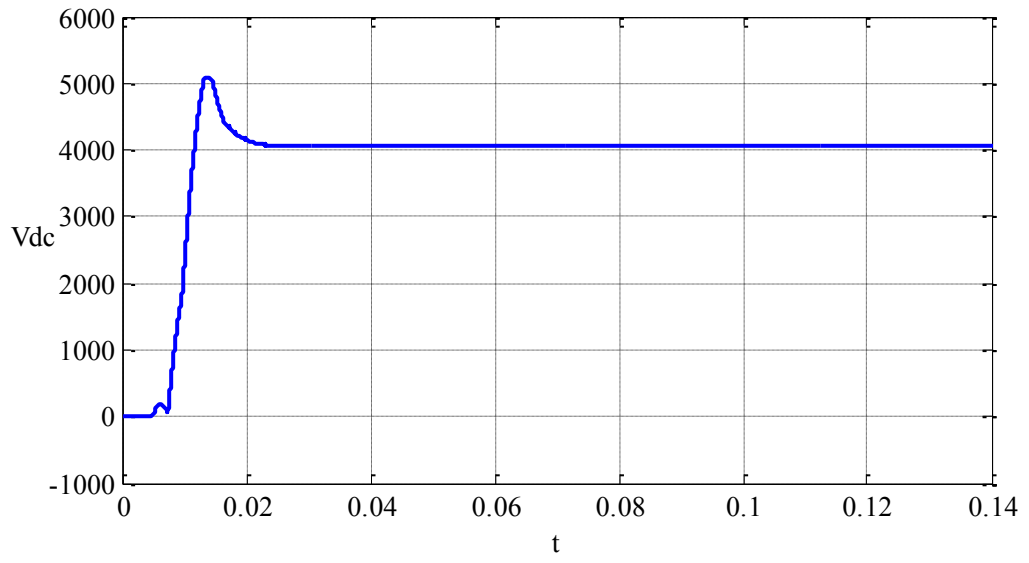
Şekil 5.51 Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG stator akımı akı bileşeni



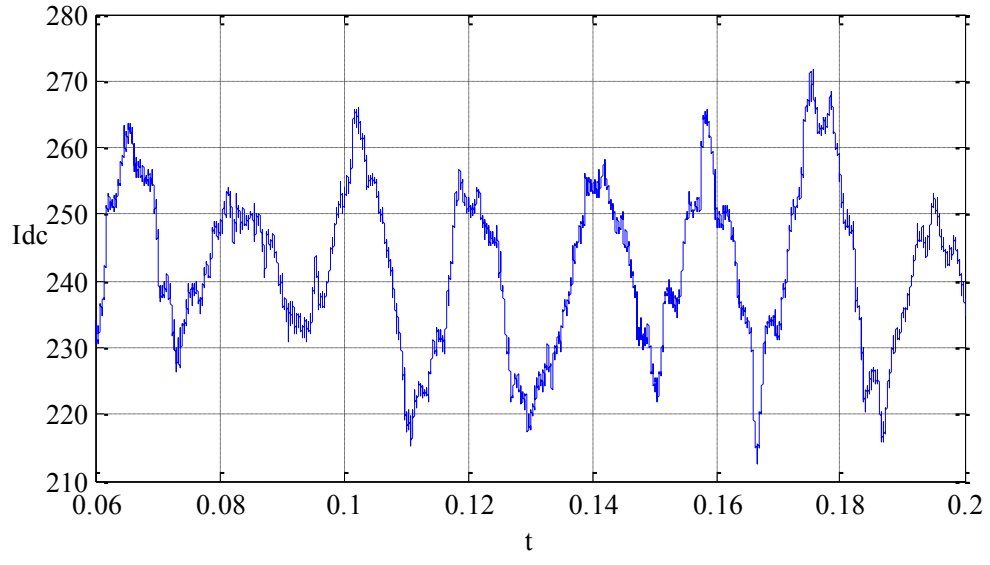
Şekil 5.52 Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG 3 faz stator akımları



Şekil 5.53 Sistem 3 HAK kontrollü doğrultucuda KMSG elektro manyetik momenti



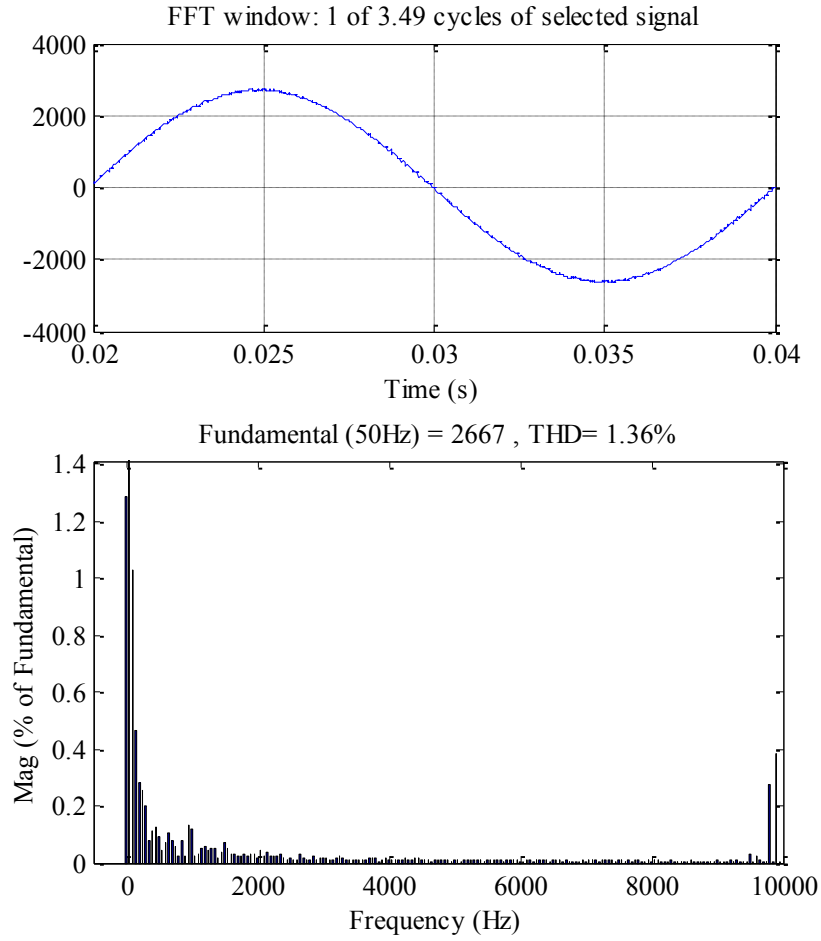
Şekil 5.54 Sistem 3 DC bara gerilimi



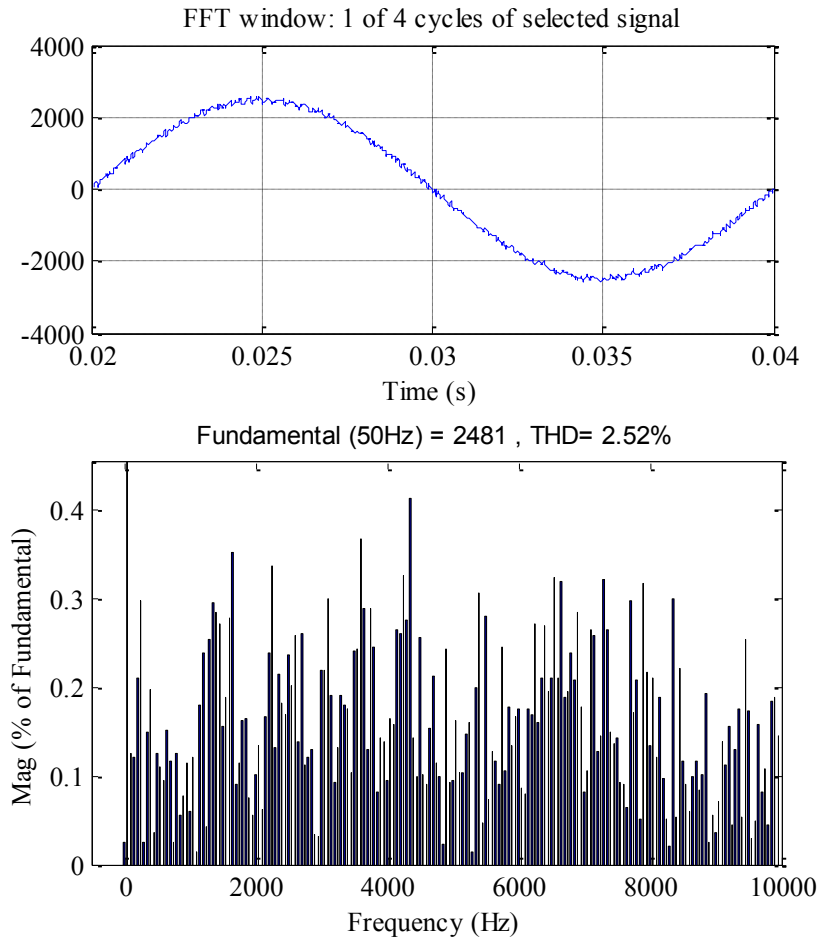
Şekil 5.55 Sistem 3 DC bara ripple akımı

5.8.4 Sistemlerin THD Karşılaştırmaları

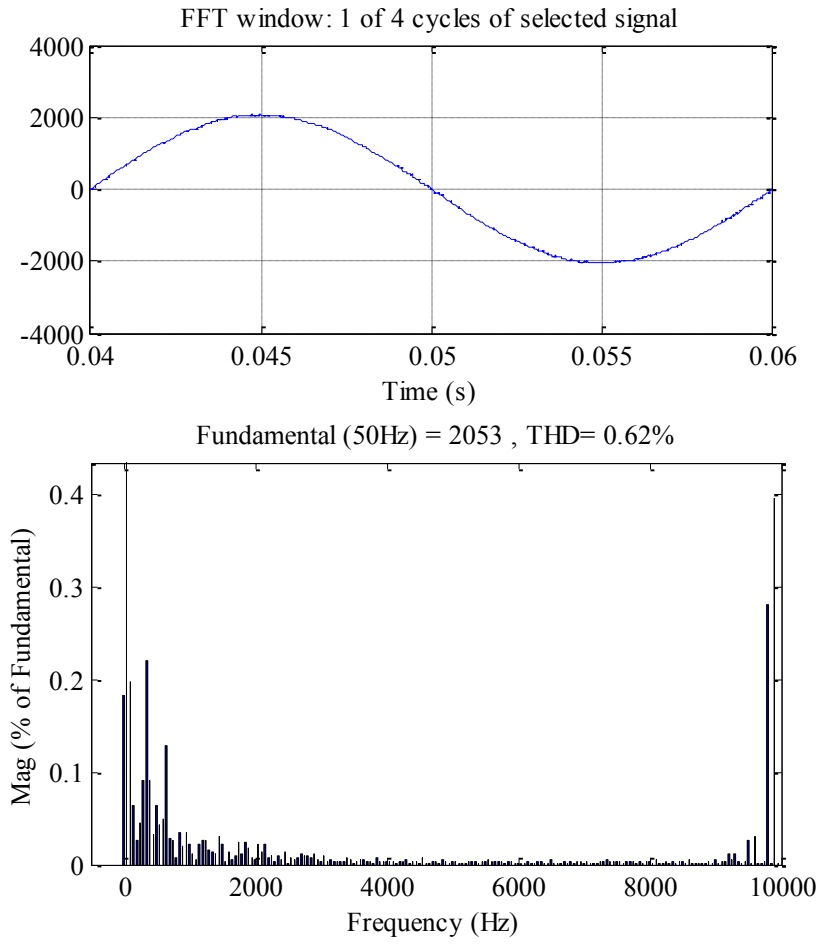
UVM ve HAK teknikleri ile anahtarlama yapan inverter çıkış akımları karşılaştırılmıştır. UVM tekniği için; 1000 V ve 850 V DC bara gerilimi seviyesine sahip sistemlerde anahtarlama frekansı 10 kHz, 4000 V DC bara gerilimine sahip sistemde ise 5 kHz olarak belirlenmiştir. HAK tekniğinde anahtarlama frekansı değişkendir.



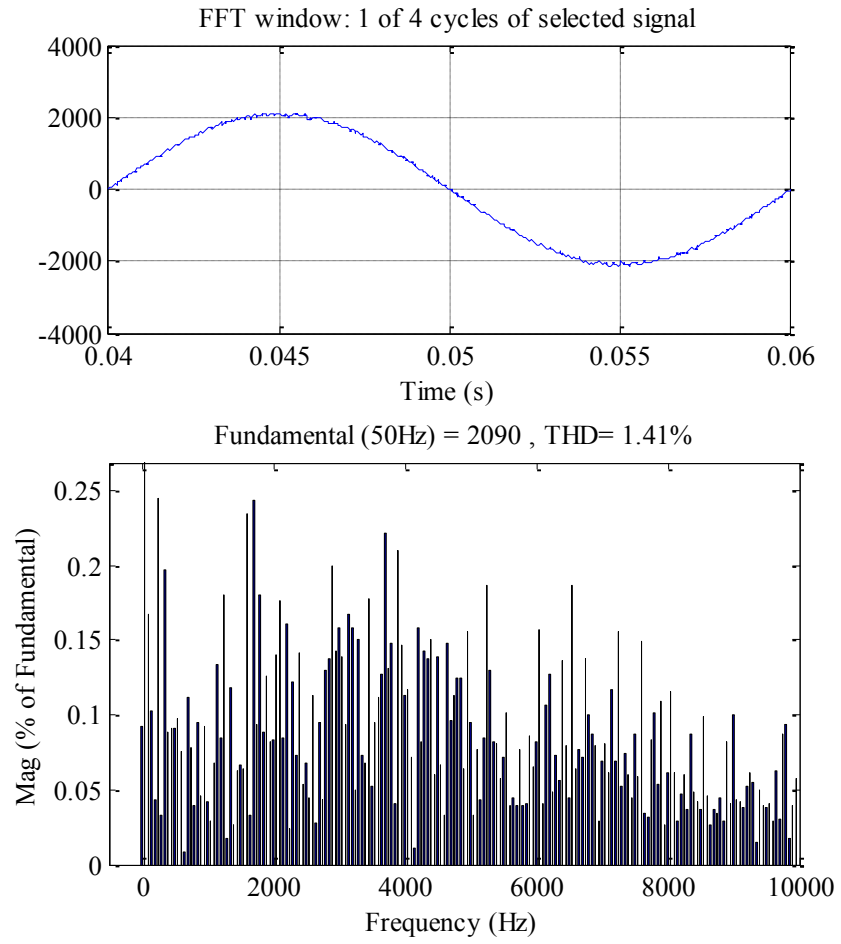
Şekil 5.56 Sistem 1 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu



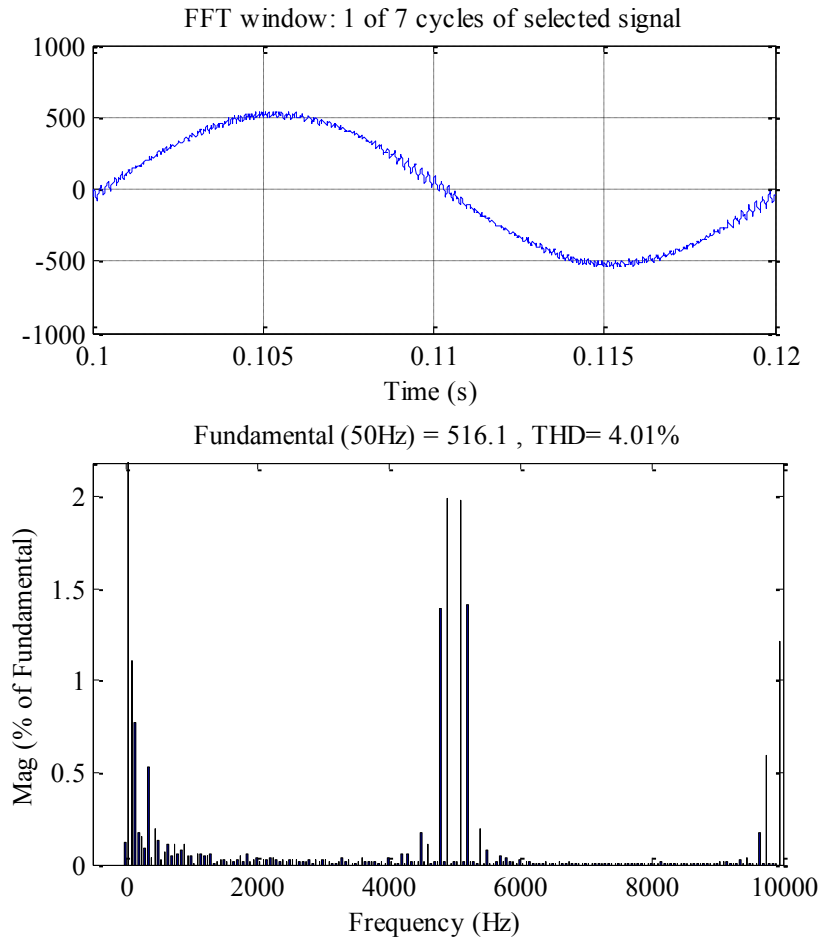
Şekil 5.57 Sistem 1 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu



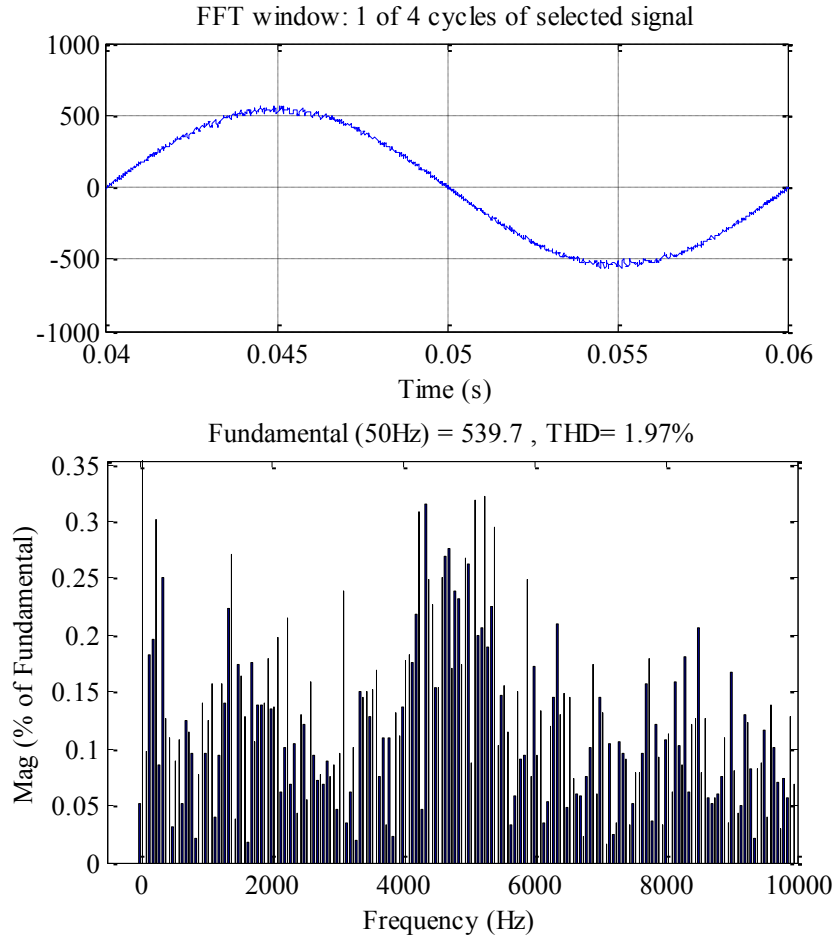
Şekil 5.58 Sistem 2 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu



Şekil 5.59 Sistem 2 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu



Şekil 5.60 Sistem 3 UVM kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu

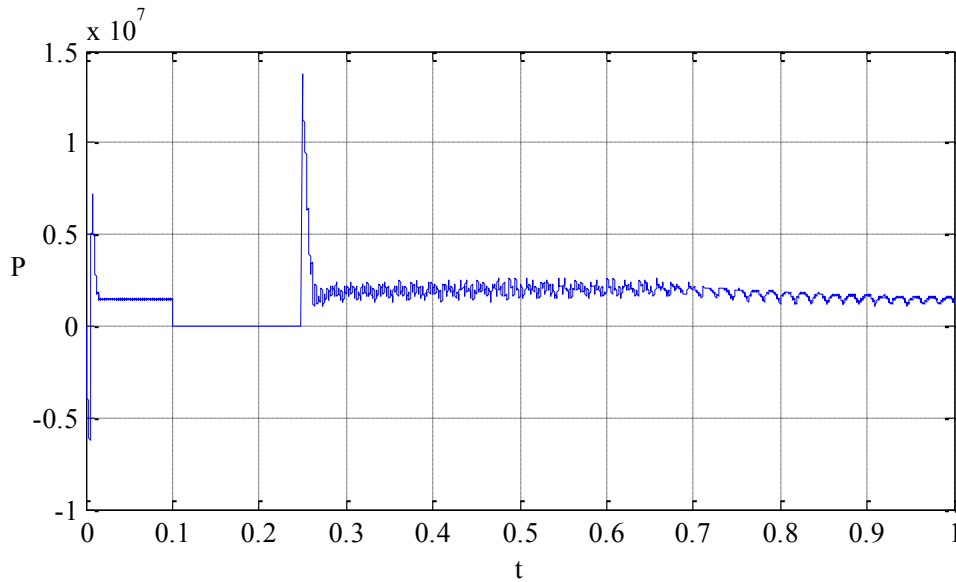


Şekil 5.61 Sistem 3 HAK kontrollü inverter çıkış akımı ve THD sonucu

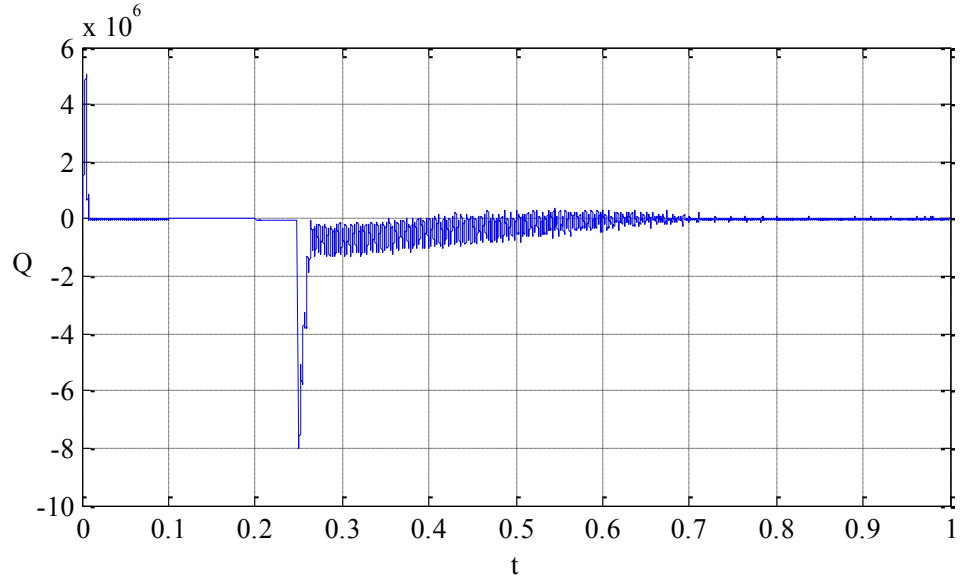
5.8.5 Sistemlerin Kısa Devre Duyarlılıkları

Rüzgâr gücünün getirileri ve gelecekteki kapasite artışı, ancak rüzgâr çiftliklerinin, sistemin kararlılığı ve güvenilirliği için güç sistemi operatörlerince (GSO) tanımlanan düzenlemelere, şebeke yönetmeliklerine göre işletilmesiyle ulaşılabilir. Rüzgâr gücünden elektrik üretimindeki bu hızlı büyümeden önce, rüzgâr türbinleri orta ve alçak gerilim dağıtım sistemlerinde dağıtık enerji kaynağı olarak görülüyorlardı. Bu eski türbin teknolojileri, güç sistemindeki gerilim ve frekans değişikliklerine tepki verecek yeterliliğe sahip değildi. Geçmişte, bir arıza durumundaki genel uygulama, rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantısının kesilmesi ve arıza durumu ortadan kalkınca tekrar şebekeye bağlanmasıydı. Ancak, son yıllarda güç sistemi içinde rüzgâr gücü payının yükselmesi, arıza anında sistem kararlılığının bozulmaması için, arıza süresince ve arıza sonrasında rüzgâr türbinlerinin şebekeden kopmamasını zorunlu hale getirmiştir.

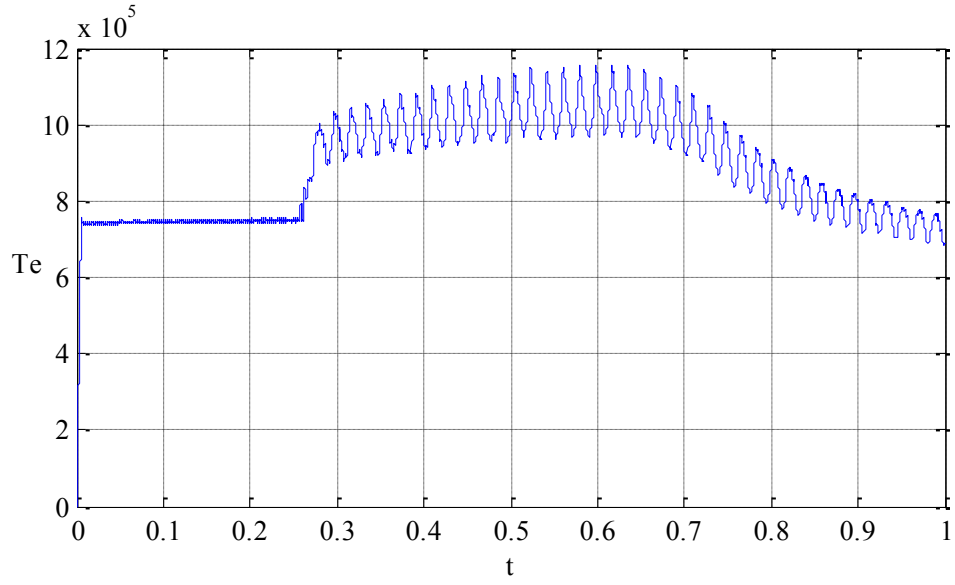
Bu bölümde, şebekede üç faz kısa devre meydana geldiği ve 150 msn boyunca devam ettiği varsayılarak verilen cevaplar karşılaştırılmıştır [10].



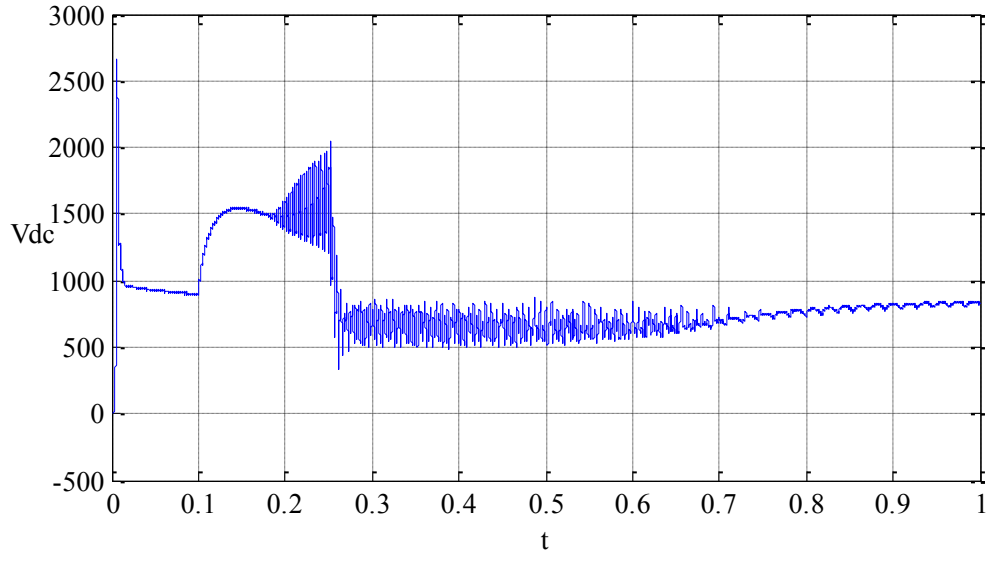
Şekil 5.62 Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı



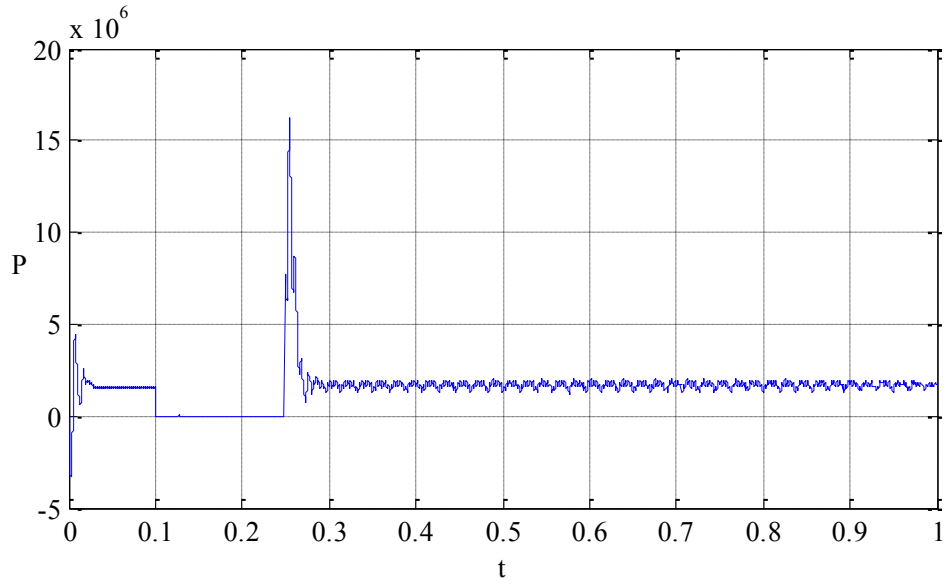
Şekil 5.63 Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı



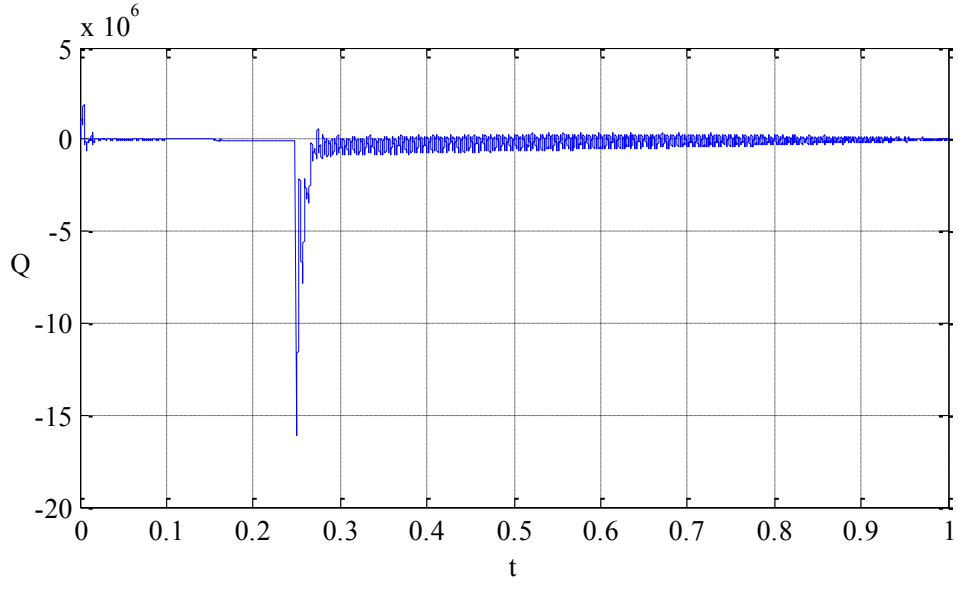
Şekil 5.64 Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı



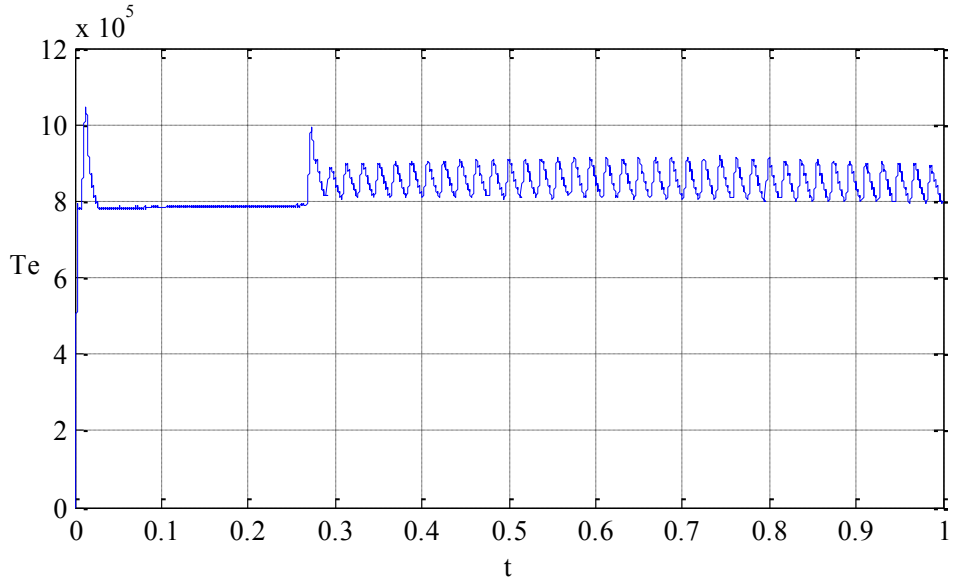
Şekil 5.65 Sistem 1' in 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı



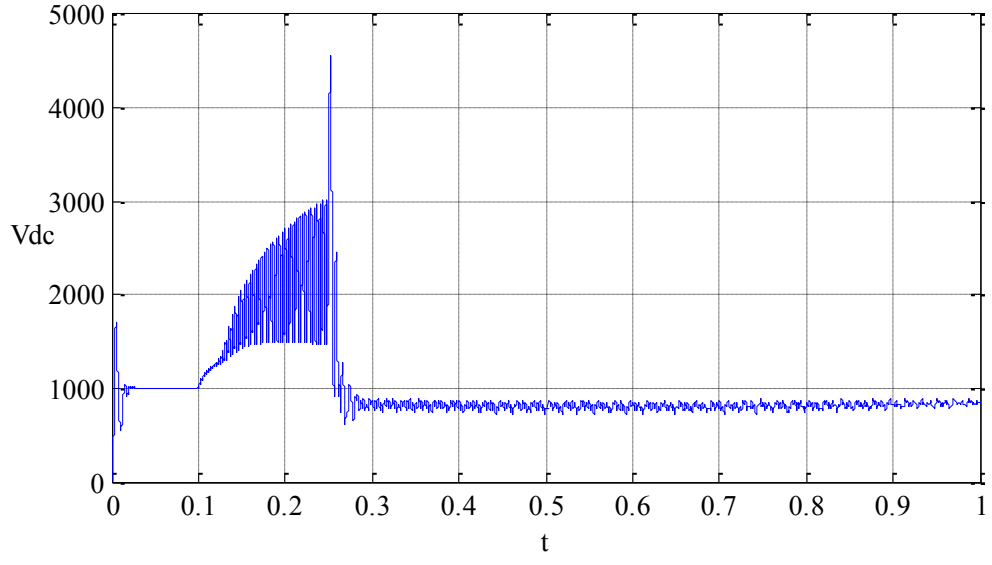
Şekil 5.66 Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı



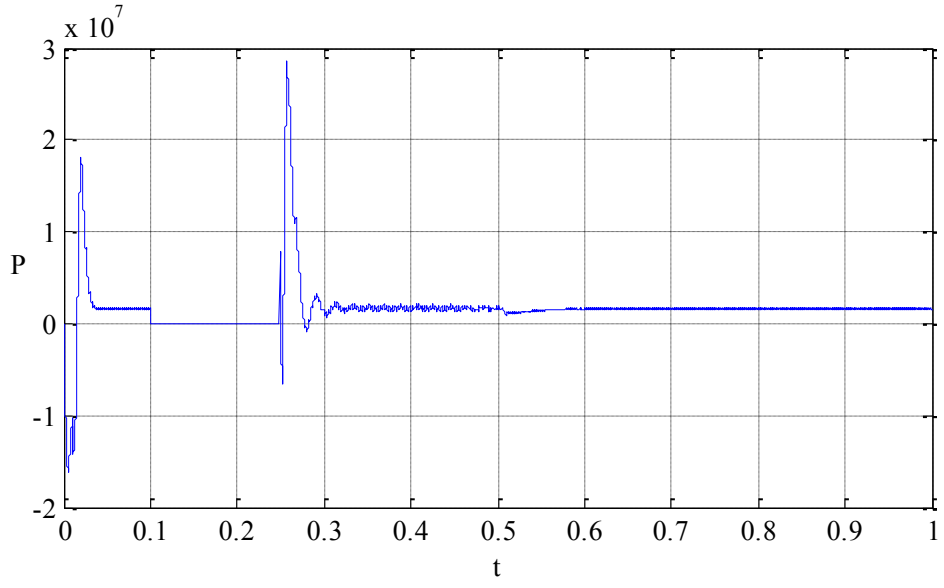
Şekil 5.67 Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı



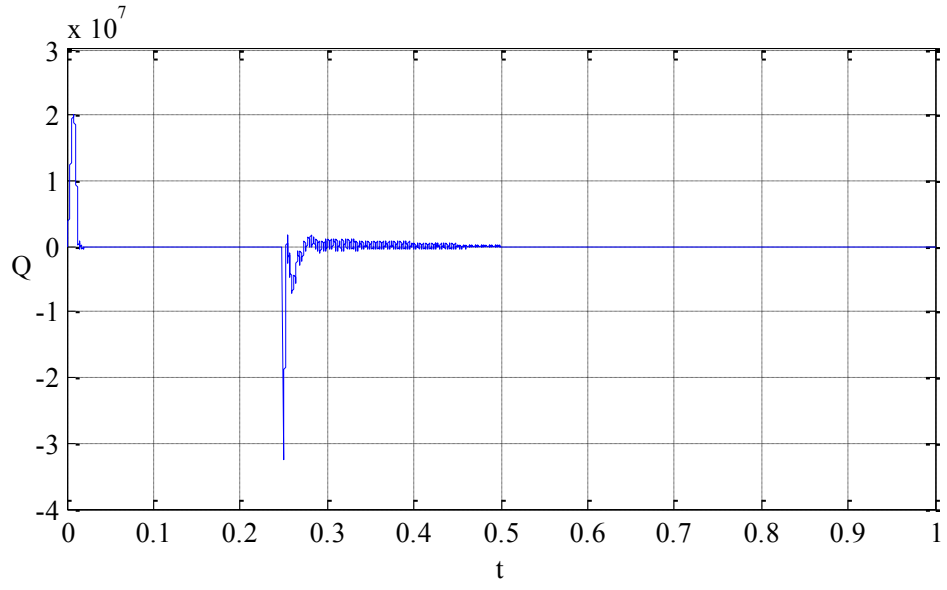
Şekil 5.68 Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı



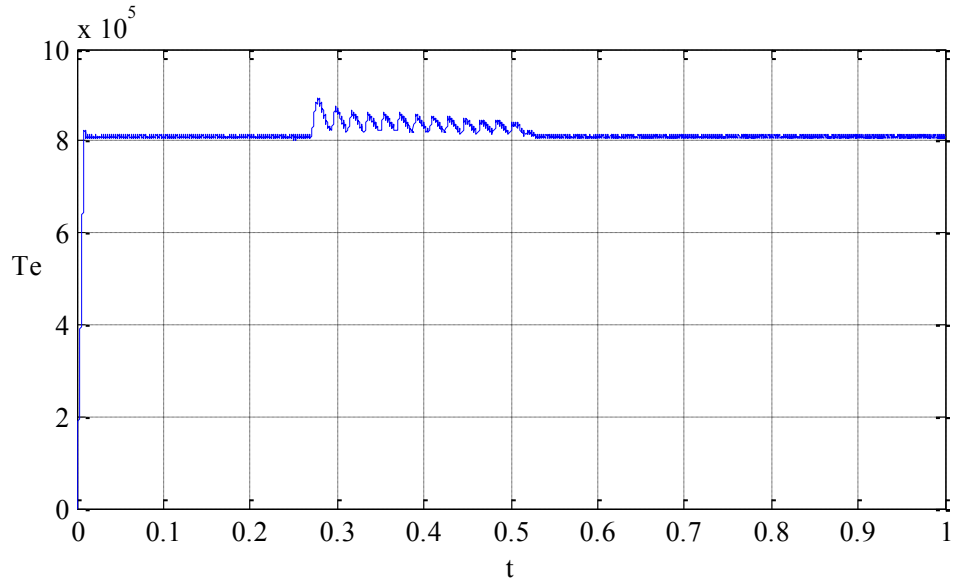
Şekil 5.69 Sistem 2' nin 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı



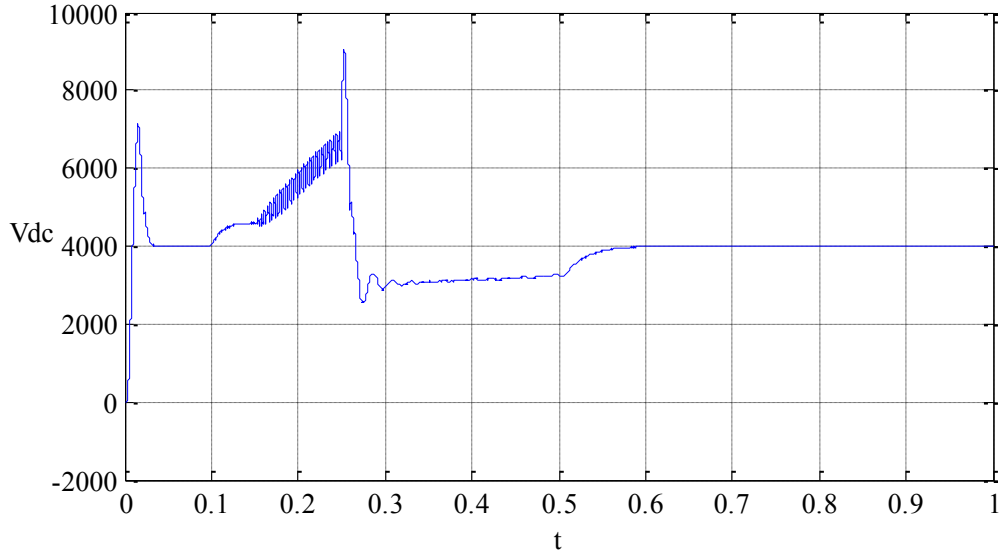
Şekil 5.70 Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası aktif güç cevabı



Şekil 5.71 Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası reaktif güç cevabı



Şekil 5.72 Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası KMSG elektro manyetik moment cevabı



Şekil 5.73 Sistem 3' ün 3 faz kısa devre arızası DC bara cevabı

5.8.6 Güç Elektroniği Elemanlarının Seçimi

Tüm sistemin simülasyon sonuçlarından yola çıkarak gerçek sistemde kullanılacak elemanların seçimi yapılmıştır. Bu elemanlar; güç yarıiletkenleri, DC bara kapasitörleri ve şebeke tarafındaki endüktanstan oluşmaktadır. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de sırasıyla generatör tarafında ve şebeke tarafındaki güç elektroniği dönüştürücülerinin eleman seçimleri ve boyutlandırmaları görülmektedir. Çizelge 5.3 DC bara kapasitörlerinin boyutlarını, adetlerini ve gereken kapasite değerine ulaşabilmek için gerekli olan bağlantı şekillerini göstermektedir. Çizelge 5.4 şebeke tarafındaki endüktans değerlerini göstermektedir. Bu endüktanslar bir filtreyi yada yükseltici transformatörün kaçak endüktansını temsil edebilir. Endüktans değerleri IEEE 519 standartlarına uyum sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 5.1 Şebeke tarafındaki güç elektroniği dönüştürücüsü

	480 V	600 V	2,4 kV
Model	FZ3600R17HP4	FZ3600R17HP5	FZ750R65KE3T
$V_{CE SAT}$ (V)	2,4	2,4	3,7
V_{CES} (V)	1700	1700	6500
I_{CNOM} (A)	3600	3600	750
I_{CRM} (A)	7200	7200	1500
$I_{IGBT rms}$ (A)	1759	1546	445,6
$I_{IGBT peak}$ (A)	2488	2186	630,2
t_r (µs)	0,78	0,78	0,8
$t_{d on}$ (µs)	0,295	0,295	0,4
t_f (µs)	1,75	1,75	7,6
$t_{d off}$ (µs)	0,345	0,345	0,5
Güç Kaybı (W)	5310	4195	1575

Çizelge 5.2 Generatör tarafındaki güç elektroniği dönüştürücüsü

	480 V	600 V	2,4 kV
Model	FZ3600R17HP4	FZ3600R17HP5	FZ750R65KE3T
$V_{CE SAT}$ (V)	2,4	2,4	3,7
V_{CES} (V)	1700	1700	6500
I_{CNOM} (A)	3600	3600	750
I_{CRM} (A)	7200	7200	1500
$I_{IGBT rms}$ (A)	1469	1388	479
$I_{IGBT peak}$ (A)	2078	1963	678
t_r (µs)	0,78	0,78	0,8
$t_{d on}$ (µs)	0,295	0,295	0,4
t_f (µs)	1,75	1,75	7,6
$t_{d off}$ (µs)	0,345	0,345	0,5
Güç Kaybı (W)	2450	2500	1000

Çizelge 5.3 DC bara

DC LINK CAPACITOR BANK	480 V	600 V	2,4 kV
Tepe Gerilimi (V)	1300	1000	50
RMS Akımı	65	74	19,1
Kapasitör Değeri (mF)	0,56	0,97	5,6
Kapasitör Başına ESR (mΩ)	2,3	1,8	26
Eşdeğer ESR (mΩ)	0,23	0,23	20,0
Eşdeğer Kapasite (mF)	5,6	7,76	7,28
Adet	2 Seri 20 Paralel	2 Seri 16 Paralel	10 Seri 13 Paralel
Model	947C561K132DLHS	947C971K102DLHS	500R562M500FF2E
Gerilim Ripple (V)	16	5	5
Yüzde Gerilim Ripple (%)	1,8	0,5	0,12
I_{cap_rms} (A)	1250	1150	230
Güç Kaybı (W)	359	298	1058

Çizelge 5.4 Endüktans değerleri

FFT ANALYSIS	480 V	600 V	2,4 kV
Endüktans (mH)	12	197	1,2

5.8.7 Maliyet Hesabı

Lokal distribütörden alınan fiyatlara göre, bazı kritik elemanların fiyatları Çizelge 5.5’de verilmiştir. Sistem 3’ ün diğerlerine göre %30 daha pahalı olduğu görülebilir.

Çizelge 5.5 Maliyet Tablosu

	480 V		600 V		2,4 kV	
	Birim	Toplam	Birim	Toplam	Birim	Toplam
IGBT Fiyatı(€)	1.000	12.000	1.000	12.000	1.300	15.600
Soğutma ve Diğer (€)	500	6.000	500	6.000	500	6.000
Kapasitör Fiyatı (€)	130	5.200	150	4.800	50	6.500
TOPLAM		23.200		22.800		28.100

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 1,5 MVA gücünde ve yüzey montajlı KMSG içeren bir rüzgâr enerji sistemi detaylı olarak incelenmiştir. Üç farklı şebeke gerilim seviyesi dikkate alınarak, 480 V, 600 V ve 2400 V fazlar arası gerilim seviyeleri için simülasyonlar yapılmıştır. Her sistem için gerilim ve akım şekilleri simülasyonlar sonucunda elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları analiz edilerek ticari bir uygulama için uygun yarıiletkenler, kapasitörler ve endüktanslar belirlenmiştir.

Her sistem için endüktans değerleri, akımların %THD değerlerinin IEEE 519 standartlarına uygunluğu göz önüne alınarak optimize edilmiştir. İnverter tarafında, aynı çıkış endüktans değerleri için akım kontrolünde HAK ve UVM yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. HAK, uygulamasının ve kontrolünün kolay olmasının yanında değişken anahtarlama frekansı nedeni ile filtre tasarımını kompleks bir hale getirmektedir. UVM, sabit frekansta anahtarlama yaptığı için belirli frekans değerlerinde harmoniklere neden olmakta, uygun filtre tasarımını kolaylaştırmakta ve ticari sistemlerde kullanılması daha faydalı olan yöntemdir. KMSG kontrolü için alan yönlendirmeli kontrol kullanılmış ve doğrultucunun anahtarlanması için HAK yöntemi tercih edilmiştir. Alan yönlendirmeli kontrol direk olarak elektro manyetik momenti dolaylı olarak da DC baraya aktarılan aktif gücü dinamik bir şekilde kontrol etmiştir. Bu sayede, her sistemde de DC baraya sorunsuz bir şekilde 1,5 MW aktif güç aktarılmıştır.

Üç sistem karşılaştırıldığında, yarıiletken kayıpları en az 2400 V şebeke gerilimine sahip sistemde gözlenmiştir. Bunun nedeni daha düşük akım seviyesidir. Ancak düşük akım seviyesinin yanında yüksek gerilim seviyesi de DC bara kapasiteleri üzerinde ek

bir gerilim stresine neden olmaktadır. Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi kapasitör sayısı artmakta ve diğer sistemlere nazaran daha fazla bir güç kaybı ve kapasitör maliyeti getirmektedir.

Sistemlerin şebeke arızasındaki cevapları incelenmiştir. Her durum için şebekede 150 ms boyunca üç faz kısa devre arızası gerçekleştiği varsayılmış ve simülasyonlar buna göre oluşturulmuştur. Arıza sırasında şebeke aktif gücü sıfıra düşmektedir. Ancak KMSG hala istenilen aktif gücü DC baraya iletmektedir. Şebeke ve generatör aktif güçleri arasındaki bu dengesizlik DC baranın istenmeyen bir şekilde yükselmesine neden olmaktadır. Bu yükselme, hem DC bara kapasitörleri hem de yarıiletkenler için tehlikeli sonuçlar doğurmaktadır. Arıza giderildiğinde DC bara geriliminde ani bir düşme yaşanır, bu düşmeyi kompanze etmek isteyen KMSG ise daha yüksek momentlere çıkmaya çalışmakta ve büyük moment salınımları oluşmaktadır. 2400 V şebeke gerilimi ile çalışan sistemde DC bara gerilimi stresi diğer sistemlere göre daha düşük seviyededir. Ek olarak, aynı sistemde KMSG daha iyi bir moment cevabı üretmektedir.

Bu tez çalışması, 2400 V şebeke gerilimine sahip sistemin belirtildiği üzere diğer iki sisteme göre daha iyi sonuçlar sergilediğini göstermektedir.

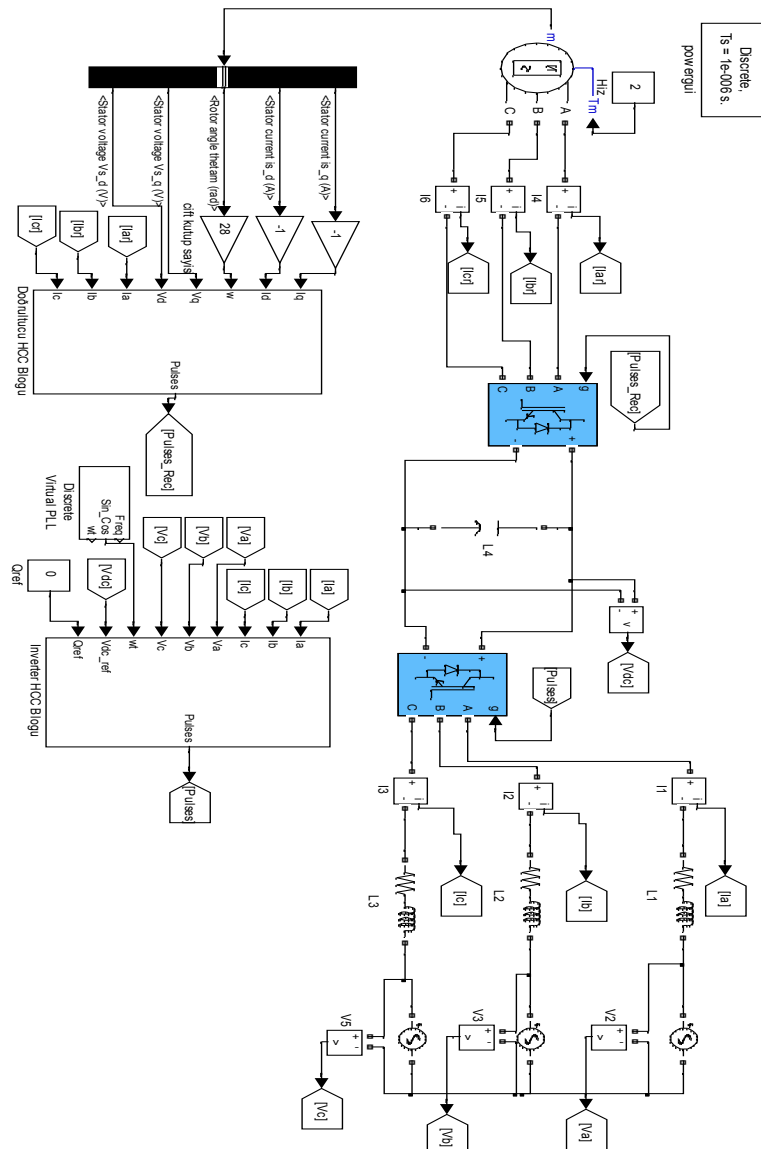
KAYNAKLAR

- [1] Mora, M.O., (2009). Sensorless vector control of KMSG for wind turbine applications, Yüksek Lisans Tezi, Institute of Energy Technology Aalborg University, Danimarka.
- [2] Johnson, G.L., (2006). Wind Energy Systems, Electronic Edition, Manhattan, KS.
- [3] Texas Instruments, (1998). Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors, Europe.
- [4] Kazmierkowski, M.P. ve Malesani, L.,(1998). "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.45, pp.691-703.
- [5] Jung, J.W., (2005). PROJECT #2 SPACE VECTOR PWM INVERTER, http://www2.ece.ohio-state.edu/ems/PowerConverter/SpaceVector_PWM_Inverter.pdf, 10 Aralık 2010.
- [6] Timbus, A., (2007). Grid Monitoring and Advanced Control of Distributed Power Generation Systems, Doktora Tezi, Aalborg University Institute of Energy Technology, Danimarka.
- [7] Chen Z. ve Spooner E., (1998). "Wind Turbine Power Converters: A Comparative Study", Power Electronics and Variable Speed Drives Conference 1998, publication no 456, pp.471-476,.
- [8] Boldea I., (2003). "Control of Electric Generators: A Review", Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE Vol.1, pp. 972-980.
- [9] Nguyen D.H., (2010). "Negnevitsky, M.: A Review of Fault Ride Through Strategies for Different Wind Turbine Systems", Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian.
- [10] Koç E. ve Güven A.N., (2011). "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi", EMO Bilimsel Dergi, 1(1):51-55.
- [11] Habetler T.G., (1993). "A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters", IEEE Transactions On Power Electronics, 8(1).

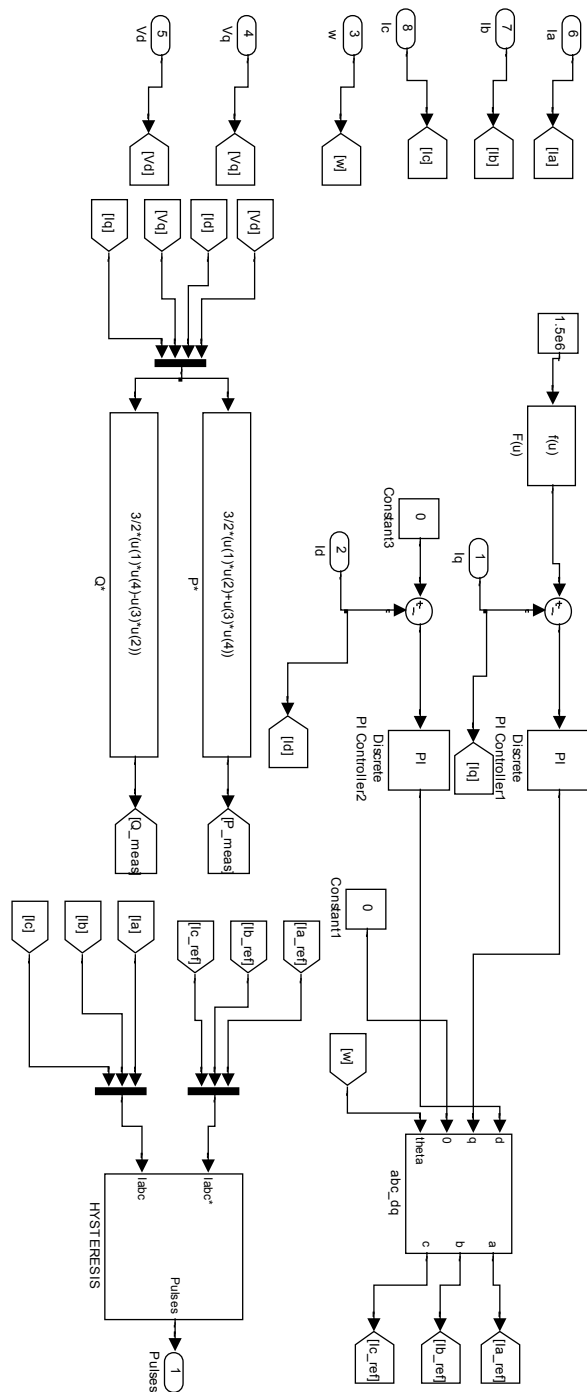
- [12] Habetler T.G., Profumo F., Pastorelli M. ve Tolbert L.M., (1992). "Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 28, No. 5, September/October 1992.
- [13] Legowski, S. ve Trzynadlowski, A.M., (1993). "Minimum-Loss Vector PWM Strategy For Three-Phase Inverters", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993. APEC '93. Conference Proceedings 1993., Eighth Annual.
- [14] Van Der Broeck, H.W. ; Skudelny, H.-C., (1988). "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol 24. No 1. January/February 1988.
- [15] Rodriguez, J., Lai, J.-S. ve Peng, F.Z., (2002). "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 49:724-738
- [16] Mora M.O., (2009). Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems, Yüksek Lisans Tezi, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.
- [17] Kulka, A. (2009). Sensorless Digital Control Of Grid Connectd Tree Phase Converters For Renewable Sources, Doktora Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Norveç.
- [18] Iov, F ve Blaabjerg, F., "Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems", Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.
- [19] Carillo C., Diaz-Dorado E., Silva-Ucha M. ve Perez-Sabin F., (2010). "Effects of WECS settings and PMSG Parameters in the Performance of a Small Wind Energy Generator", SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [20] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, New York, NY.

MATLAB/SIMULINK MODELLERİ

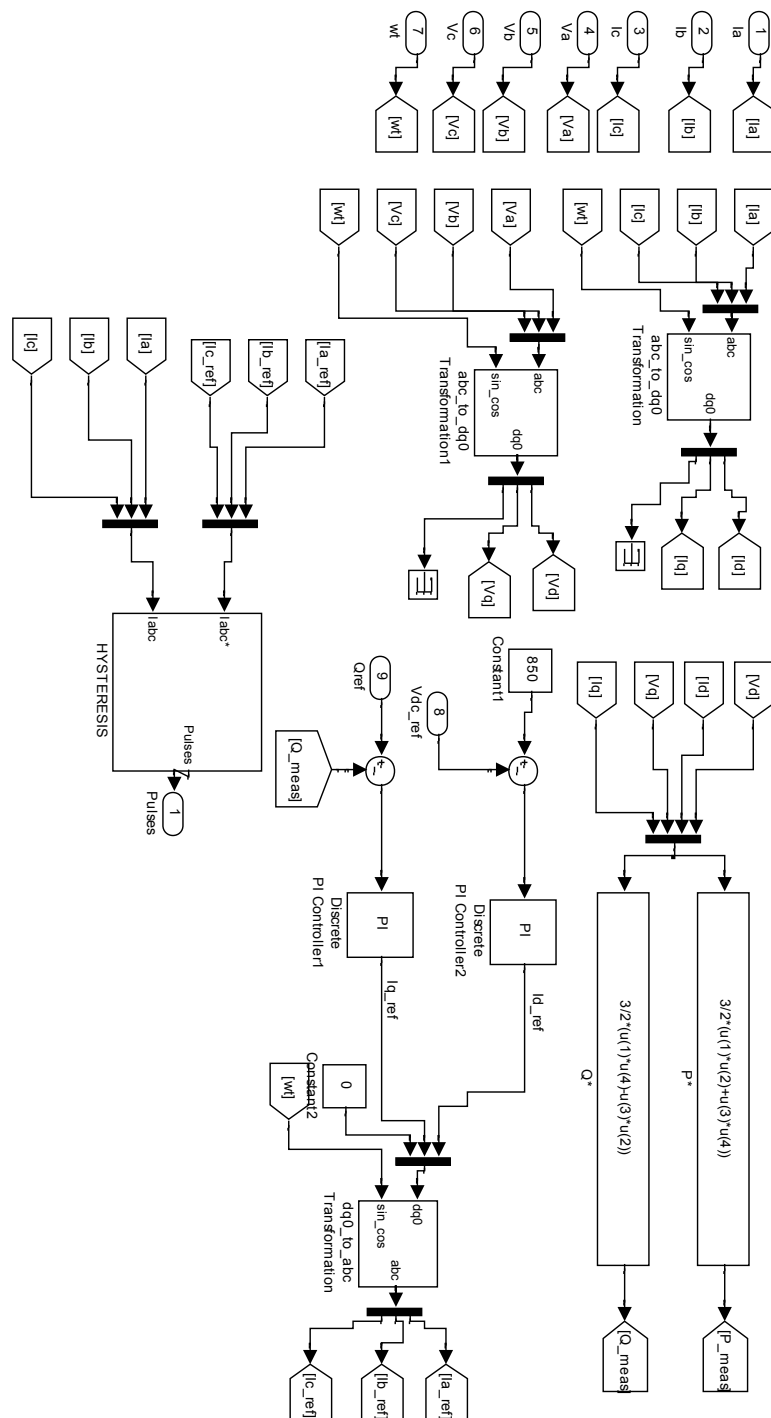
A-1 Genel Sistem Modeli



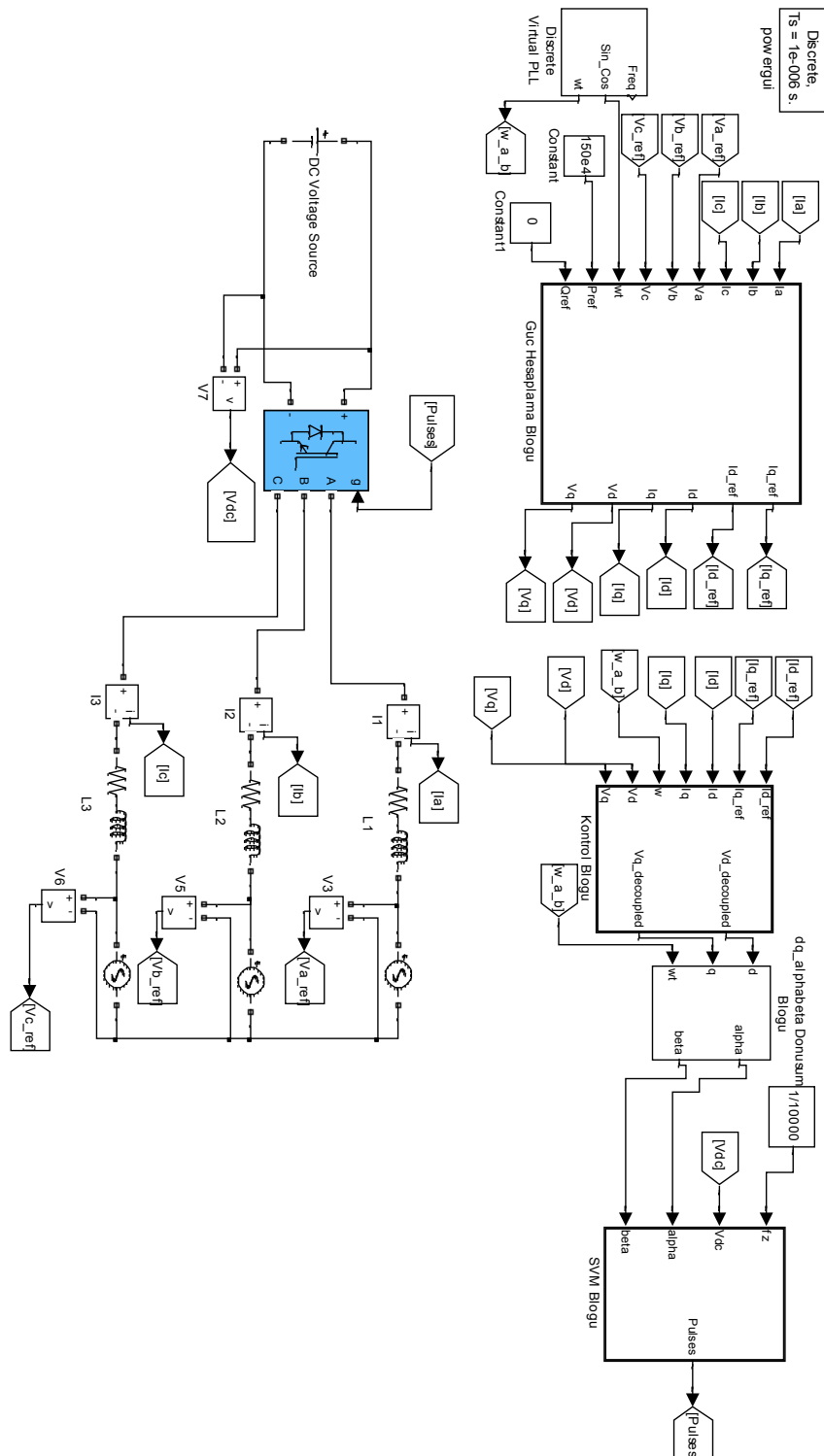
A-2 Doğrultucu HAK Bloğu



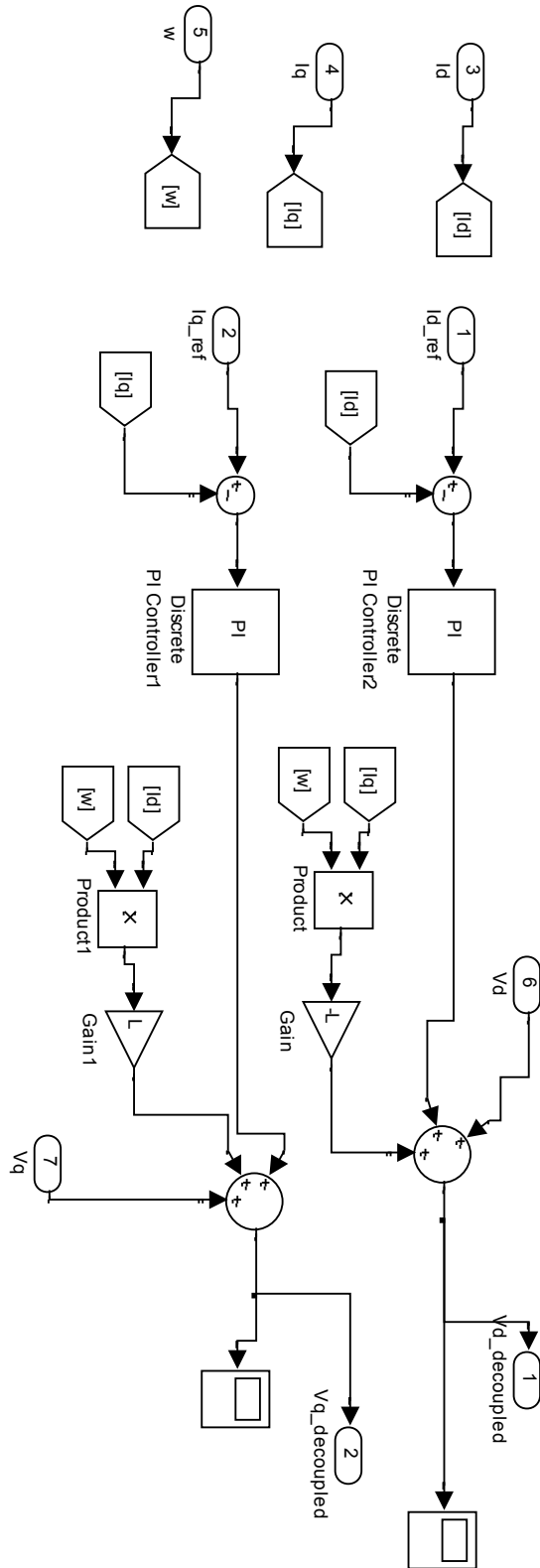
A-3 Inverter HAK Bloğu



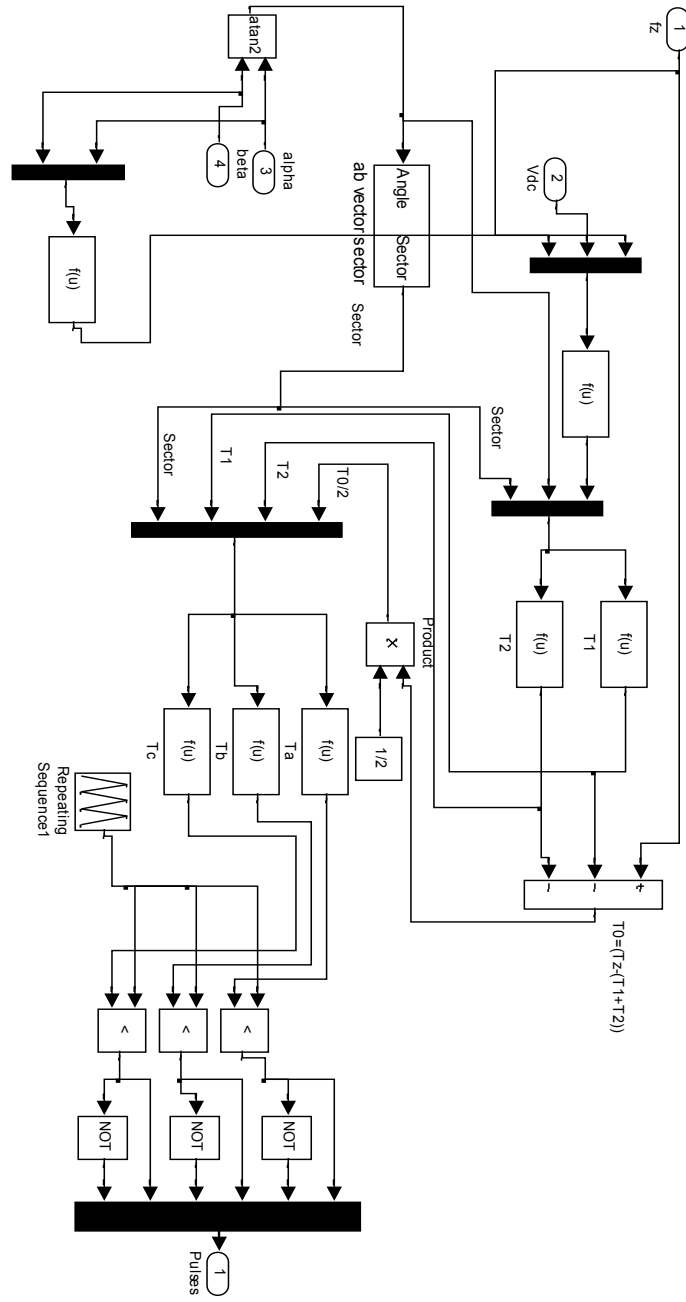
A-4 İnverter UVM Bloğu



A-5 İverter UVM Kontrol Bloğu



A-6 İverter UVM Modülasyon Bloğu



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mertcan ATALAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.07.1985 Edirne
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mertcanatalan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen/Matematik	Edirne Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-Devam	Endüstriyel Enerji San. ve Tic. Ltd. Şti.	Elektrik Mühendisi
2008-2009	EST Enerji Sistem Teknolojileri Sanayi İç ve Dış Tic. Ltd. Şti.	Elektrik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Meşe, E. ve Atalan, M., (2011). “On The Design Considerations Of A 1,5 MVA Wind Power System”, EPE'11 ECCE Europe, the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 30 August-01 September 2011, Birmingham, United Kingdom.