



Elektrik Motor Sürücü Devreler Dersi & Elektromekanik Enerji Dönüşümü-2 Dersi

1kW Rüzgar Türbini Tasarımı

Hazırlayanlar:

Bayram Oğuz

İbrahim Özer

Yasin Özer

Halil Ünlü

Uğur Altıntaş

Bayram Oğuz

Korhan Anıl Yılmaz

- 05140000577

- 05140000578

- 05150000588

- 05140000544

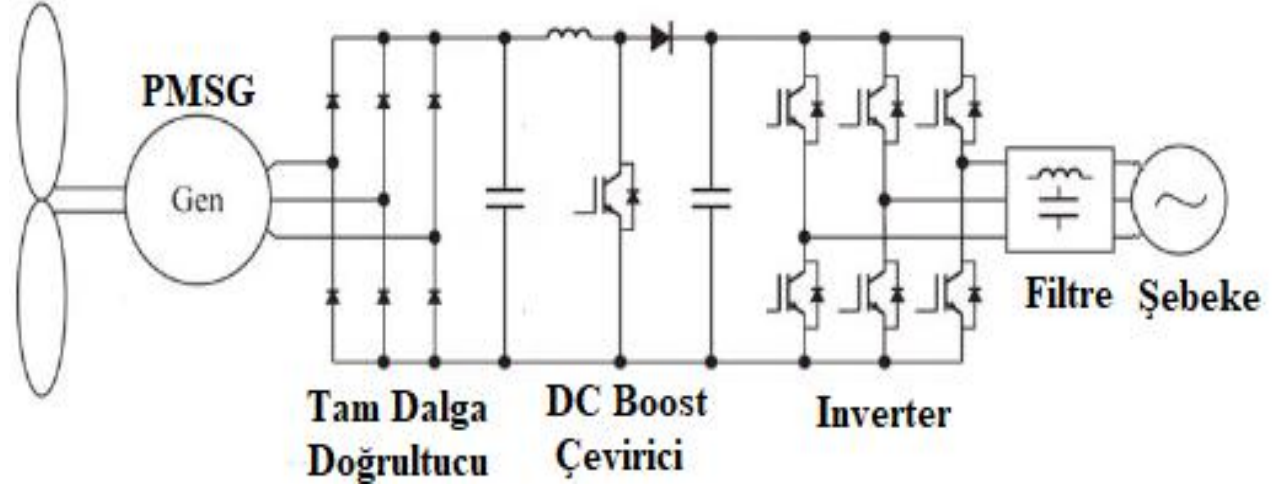
- 05140000591

- 05140000577

- 05110001004



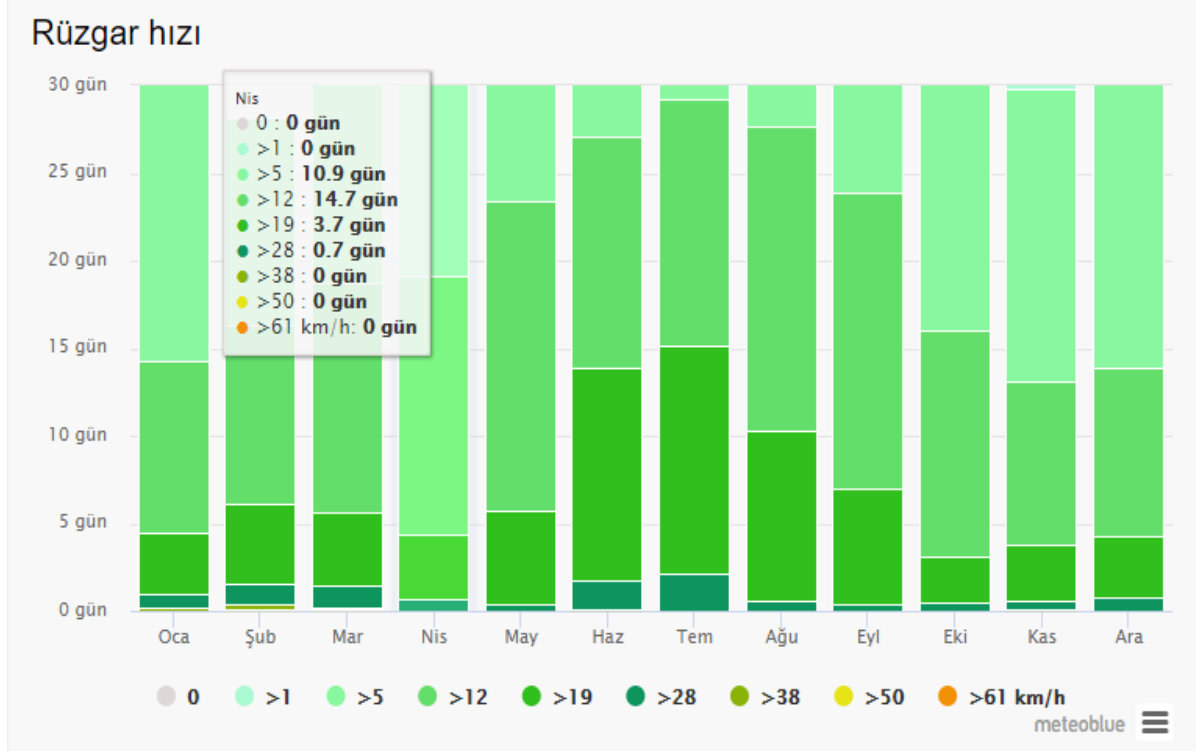
Sistem Mimarisi:



- Değişen rüzgar hızı ve dolayısıyla değişen jeneratör çıkış gerilimleri için PI ile kontrol edilen ve sistemin çıkış voltajını sabit değerde tutacak rüzgar türbin tasarımı yapılacaktır.
- Projede, düşük hız aralıklarında çalışabilmesi, dişli kutusuna ihtiyaç duymaması, aktif ve reaktif güç kontrolünün tam olarak yapılabilmesi, dışarıdan rotor uyarma akımına ihtiyaç duymaması gibi özelliklerinden dolayı jeneratör olarak, Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör kullanılacaktır. Gerekli uyarma alanını rotor üzerinde bulunan mıknatıs üretmektedir. Bu durum, bakım kolaylığı sağlamakta ve verimli çalışmasını sağlamaktadır.

- Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör'den çıkan 3 fazlı A.C. gerilim, üç fazlı tam dalga **doğrultucudan** geçirilerek D.C. gerilime dönüştürülür.
- Bu D.C gerilim, **Boost** çevirici devresi ile yükseltilir.
- Çıkış gerilimini kontrol altında tutmak ve rüzgar hızı değişiminden bağımsız, sabit bir gerilim değeri elde etmek için boost çeviricide bulunan anahtarlama elemanına uygulanan PWM sinyali, **PI** kontrolüne dayalı bir yöntem ile kontrol edilmektedir.
- Daha sonra bu sabit gerilim, **3-fazlı PWM Inverter** ile istenilen frekansta A.C. dalga formuna dönüştürülerek şebekeye basılacaktır.

Söke'de Rüzgar Hızları

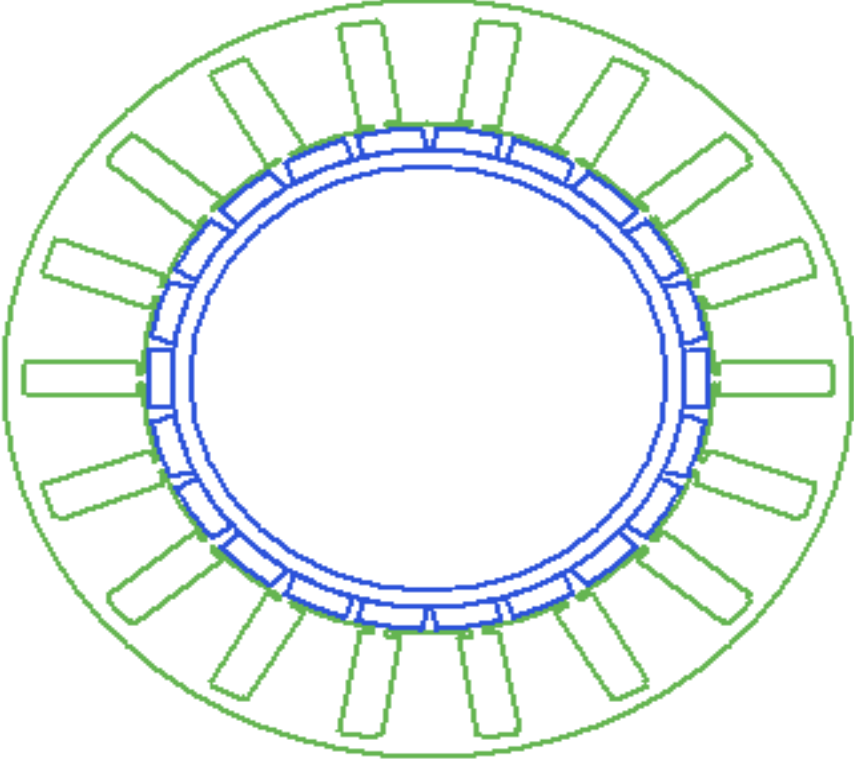


Tablo 1. Söke'de 30 m yükseklikteki onar dakikalık ölçümlerden ve birer saatlik ortalamalardan elde edilen esme sayılarının rüzgar hızlarına göre dağılımı.

Rüzgar Hızı Aralığı (m/s)	Onar dakikalık ölçümler için esme sayısı	Saatlik ortalama hızlar için esme sayısı
0-1	5389	705
1-2	8477	1617
2-3	8450	1467
3-4	6975	1159
4-5	5648	939
5-6	4696	809
6-7	4020	664
7-8	2993	485
8-9	2006	310
9-10	1488	234
10-11	1042	170
11-12	694	116
12-13	422	51
13-14	217	33
14-15	92	17
15-16	58	7
16-17	27	0
17-18	9	1
18-19	1	0
19-20	0	0
20-21	0	0
21-22	0	0
Toplam	52704	8784

Söke'de 30m yükseklikte çalışacak bir rüzgar türbin tasarımı için yapılan rüzgar hızı ölçümüne göre, rüzgar hızı aralığı 0-17m/s'dir. Ortalama rüzgar hızı 3-12m/s arasındır. Jeneratör tasarımında bu aralık dikkate alınmıştır.

Generator Hakkında Bilgiler



- Generator 22 kutup 18 stator oluk sahiptir.
- Stator ve rotor çeliğinde stell1010 çeliği, mıknatıs olarak NdFe35 kullanılmıştır.
- Stator dış çapı 265mm iç çapı 180mm uzunluğu 200mm dir.
- Rotor dış çapı 176mm iç çapı 150mm uzunluğu 200mm dir.

Simülasyon yapılacak değerler

- Generator 1kW çıkış gücünde yük tipi infinite bus olarak ayarlandı.
- Farklı rüzgar hızlarında generatorün dönüş hızı 150rpm ile 200rpm arasında değiştiği varsayılmıştır.
- Çoğunlukla 175rpm de dönecek şekilde varsaydığımız için bu değere göre tasarım yaptık.
- 150rpm de 120V 175rpm de 140V 200 rpm de 150V rated gerilimde simüle edilmiştir.

	Name	Value	Unit
	Name	Setup2	
	Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Operation Type	Generator	
	Load Type	Infinite Bus	
	Rated Output Power	1000	W
	Rated Voltage	140	V
	Rated Speed	175	rpm
	Operating Temperature	75	cel

Rmxprt Simülasyon Sonuçları

Data:	Full-Load Operation		
	Name	Value	Units
1	RMS Line Current	4.32522	A
2	RMS Phase Current	4.32522	A
3	Armature Thermal Load	2.25416	
4	Specific Electric Loading	963.731	A_per_meter
5	Armature Current Density	2.33899	
6	Frictional and Windage Loss	0	W
7	Iron-Core Loss	0.00162085	W
8	Armature Copper Loss	67.7858	W
9	Total Loss	67.7874	W
10	Output Power	1000.57	W
11	Input Power	1068.36	W
12	Efficiency	93.655	
13	Apparent Power	1050.8	
14	Power Factor	0.9522	
15	Synchronous Speed	175	rpm
16	Rated Torque	58.2974	NewtonMeter
17	Power Angle	6.55032	deg
18	Maximum Output Power	4582	W
19	Short Circuit Current	28.6988	A

- 150rpm de 120V 200rpm de 150V olacak şekilde verim %93 olmuştur.
- Çoğunlukla 175rpm de dönecek şekilde varsaydığımız için bu değere göre tasarım yaptık.
- Armatür current density 2.3 A/mm^2 değeri ile 5 ten küçüktür.

Rmxprt Simülasyon Sonuçları

Data: No-Load Operation

	Name	Value	Units
1	Stator-Teeth Flux Density	1.22546	tesla
2	Stator-Yoke Flux Density	1.46639	tesla
3	Rotor-Yoke Flux Density	1.54786	tesla
4	Air-Gap Flux Density	0.878873	tesla
5	Magnet Flux Density	0.918821	tesla
6	Stator-Teeth Ampere Turns	47.5444	
7	Stator-Yoke Ampere Turns	24.2833	
8	Rotor-Yoke Ampere Turns	17.6593	
9	Air-Gap Ampere Turns	1486.2	
10	Magnet Ampere Turns	-1576.13	
11	Leakage-Flux Factor	1	
12	Stator Yoke Correction Factor	0.482032	
13	Rotor Yoke Correction Factor	0.446422	
14	Fundamental Back emf	156.436	V
15	THD of Back emf	0.309633	
16	Cogging Torque	1.51174	NewtonMeter

- Stator teeth flux density stator yoke flux density ve rotor yoke flux density 1.5 T değerine yakındır. Air gap density 0.9 değerine yaklaştırılmıştır.
- Stator winding factor 1 değerine yakın 0.9 dur.

Data: Steady State Parameters

	Name	Value	Units
1	Stator Winding Factor	0.901912	
2	D-Axis Reactive Inductance Lad	1.39561	mH
3	Q-Axis Reactive Inductance Laq	1.39561	mH
4	D-Axis Inductance L1+Lad	14.5703	mH
5	Q-Axis Inductance L1+Laq	14.5703	mH
6	Armature Leakage Inductance L1	13.1747	mH
7	Zero-Sequence Inductance L0	7.91781	mH
8	Armature Phase Resistance R1	1.20782	ohm
9	D-Axis Time Constant	0.00115548	s
10	Q-Axis Time Constant	0.00115548	s

Rmxprt Simülasyon Sonuçları

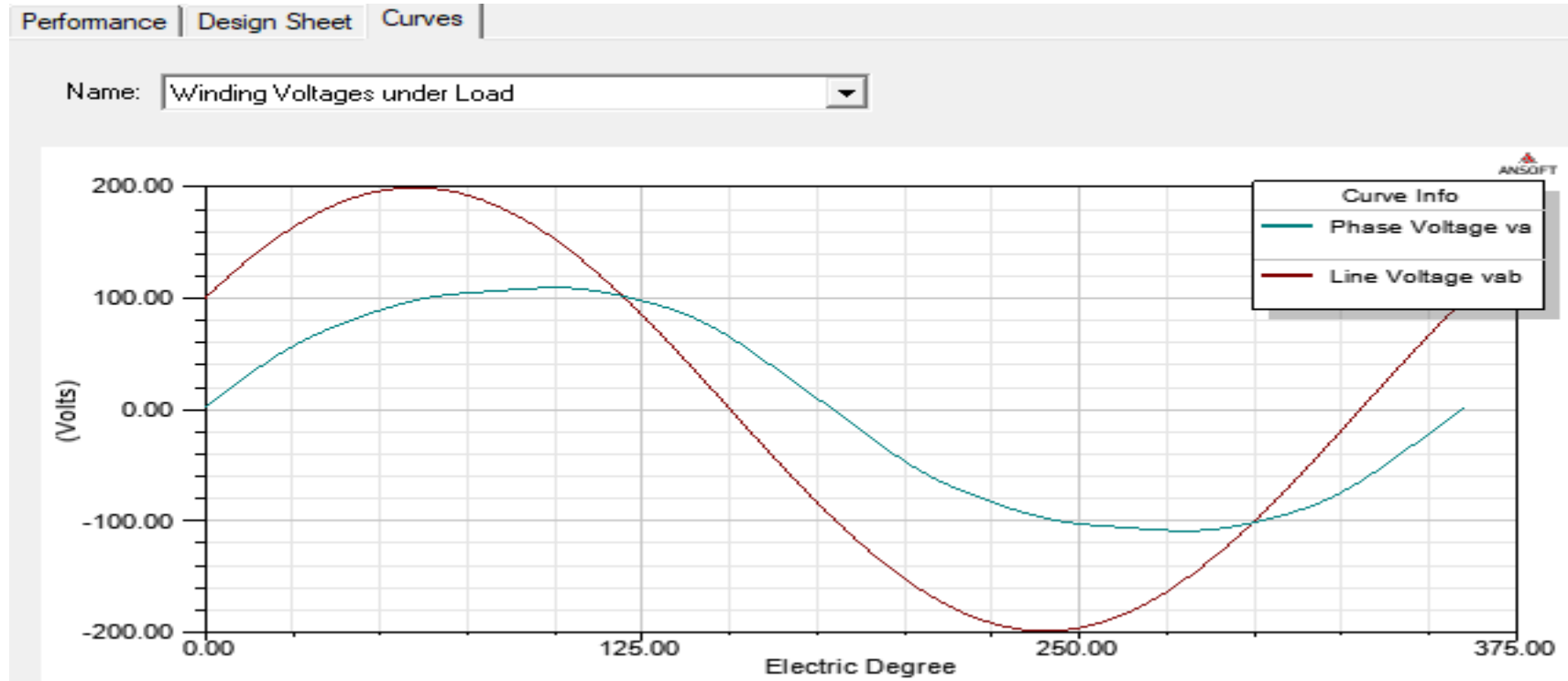
Data: Material Consumption

	Name	Value	Units
1	Armature Copper Density	8900	
2	Permanent Magnet Density	7400	
3	Armature Core Steel Density	7872	
4	Rotor Core Steel Density	7872	
5	Armature Copper Weight	5.08174	kg
6	Permanent Magnet Weight	4.58347	kg
7	Armature Core Steel Weight	31.7913	kg
8	Rotor Core Steel Weight	4.39809	kg
9	Total Net Weight	45.8546	kg
10	Armature Core Steel Consumption	75.4444	kg
11	Rotor Core Steel Consumption	31.9813	kg

- Material Consumption değerleri görülmektedir.
- Motorumuzun toplam ağırlığı 45.8kg olup bunun 5kg ı armatür bakır ağırlığıdır.

Rmxprt Simülasyon Sonuçları

- Sargılardaki gerilim



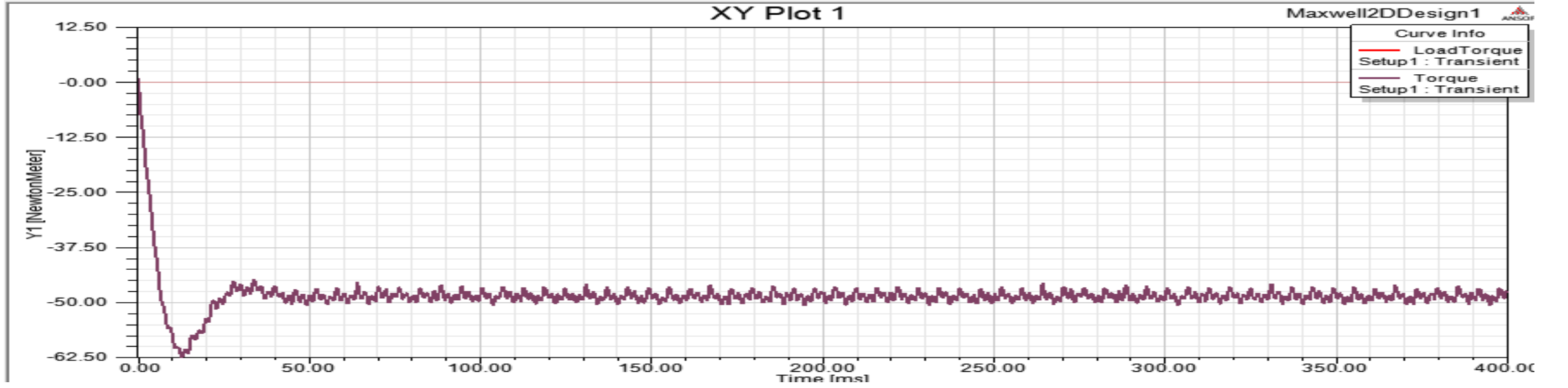
Rmxprt Simülasyon Sonuçları

- Generator genel özellikleri

Performance	Design Sheet	Curves
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR DESIGN		
File: Setup2.res		
GENERAL DATA		
Rated Output Power (kW):	1	
Rated Power Factor:	0.75	
Power Factor Type:	Inductive	
Rated Voltage (V):	140	
Number of Poles:	22	
Frequency (Hz):	32.0833	
Frictional Loss (W):	0	
Windage Loss (W):	0	
Rotor Position:	Inner	
Operating Temperature (C):	75	
Type of Circuit:	Y3	
Operation Type:	Infinite Bus	
Domain:	Time	

Maxwell 2D simülasyon sonuçları

- Tork şu şekildedir.



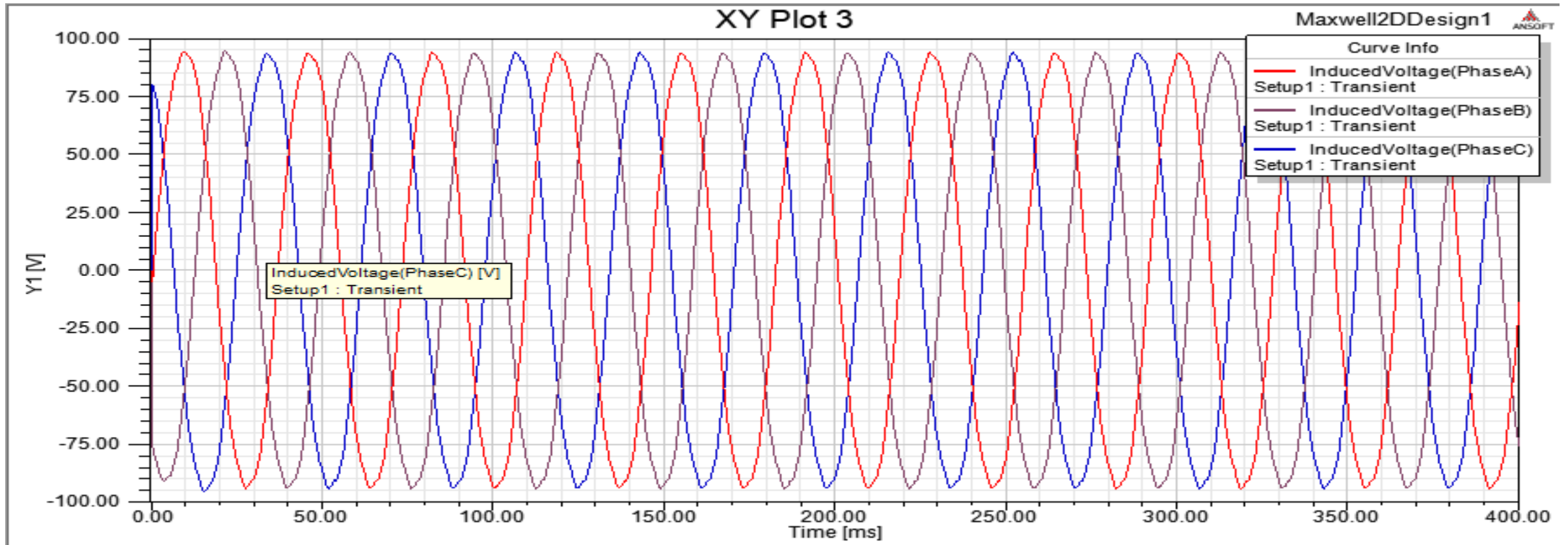
Maxwell 2D simülasyon sonuçları

- Faz akımlarımız



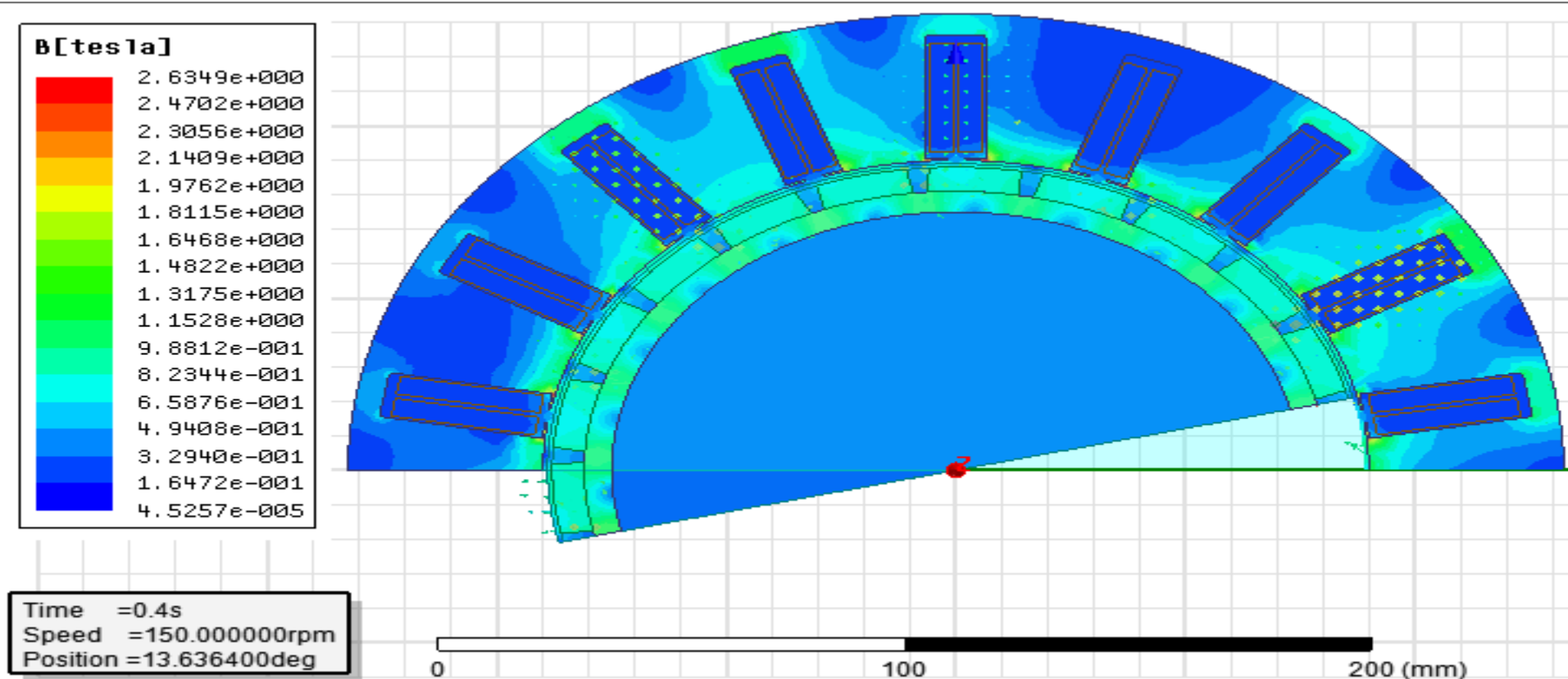
Maxwell 2D simülasyon sonuçları

- Fazlarda indüklenen voltaj



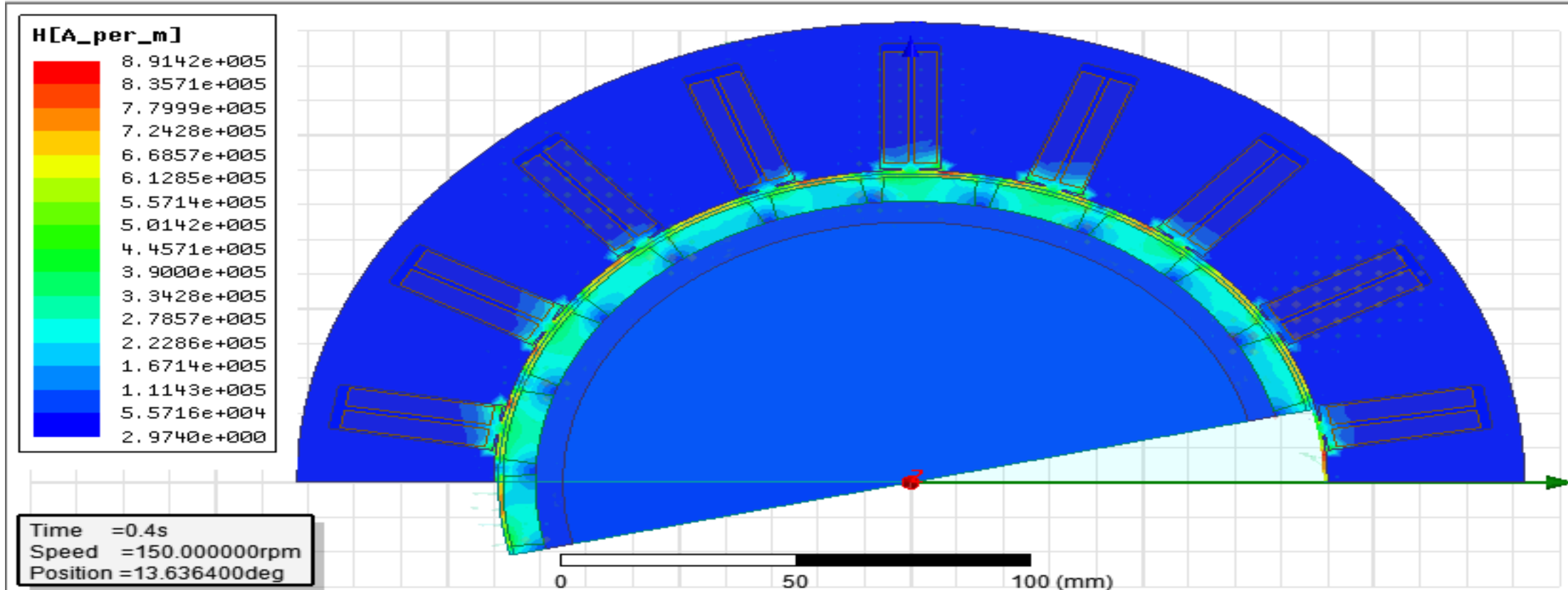
Maxwell 2D simülasyon sonuçları

- Manyetik akı yoğunluğu:

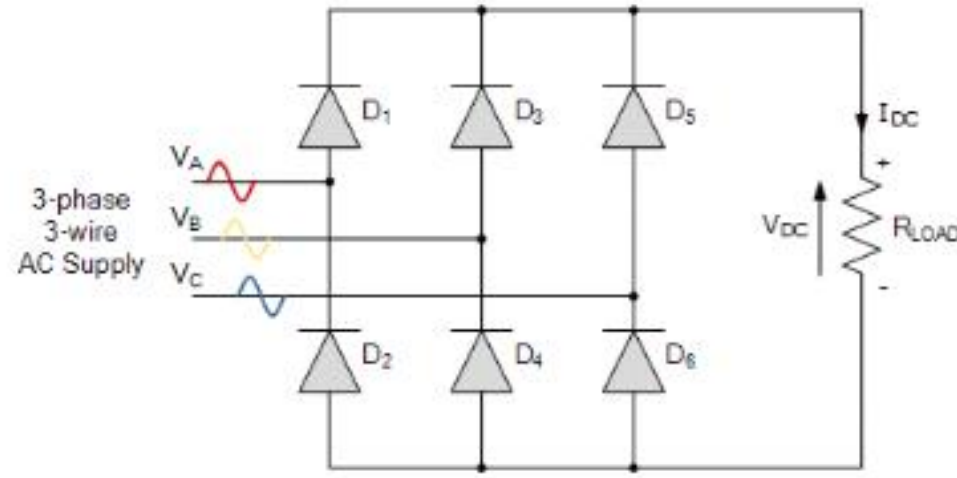


Maxwell 2D simülasyon sonuçları

- Manyetik alan şiddeti:

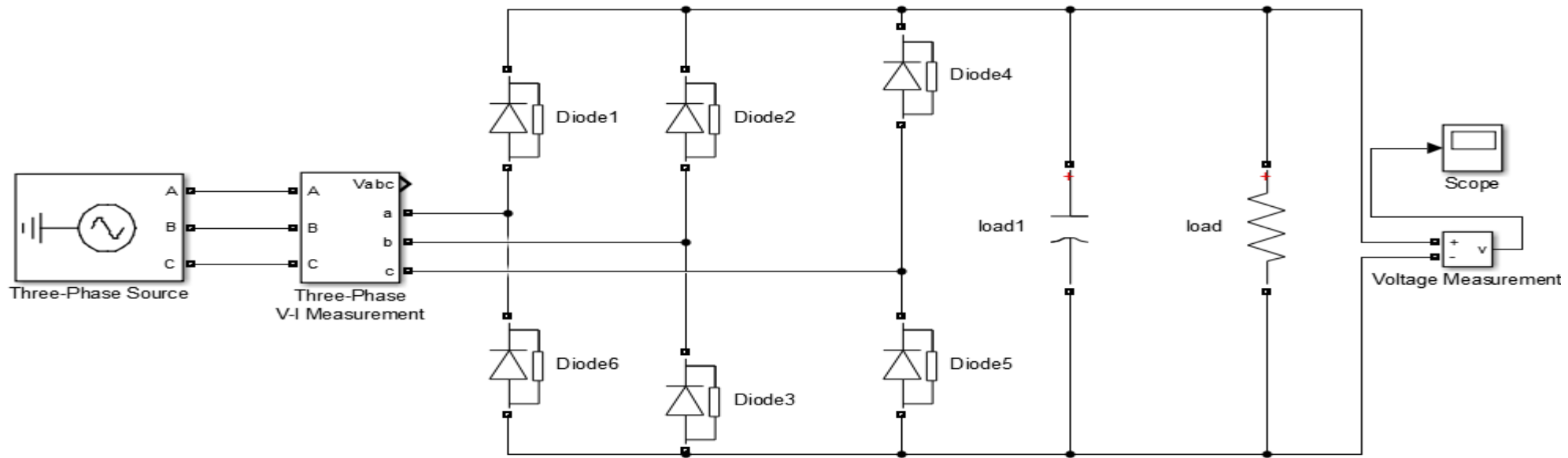


3-Phase AC/DC Full-Wave Rectifier



- Doğrultucu elemanı olarak **diyot** kullanılmıştır.
- Elde etmemiz gereken gerilim değerleri boost converter ile sabit olarak elde edileceğinden kontrolsüz doğrultucu seçilmiştir. Ayrıca ek kapı sürücü gerektirmemesi tasarımı kolaylaştıracaktır.
- Yüksek gerilimlerde çalıştığımızdan diyot gerilim düşümü ihmal edilebilir seviyelerdedir.

3-Phase AC/DC Full-Wave Rectifier



- Average output voltage

$$V_{dc} = \frac{12}{2\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos \omega t d(\omega t)$$
$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654V_m$$

$$V_{L,peak} = 150 * 1.41 = 212V$$

$$V_s = V_{L,peak} / 1.73 = 122.47V$$

$$V_{dc} = V_s * 1.654 = 202.57V$$

$$R_{load} = V_{dc}^2 / (1kW) = 41 \text{ Ohm}$$

3-Phase AC/DC Full-Wave Rectifier

Kapazitör Seçimi:

- Doğrultucunun çıkışında DC bileşeni olan ancak üzerinde AC bileşeni bulunan voltajı filtreleyerek DC-Link oluşturmak amacıyla kullanılacaktır.
- Seçiminde ki en önemli parametre deşarj süresinde üzerinde ki voltaj seviyesinin inebileceği minimum seviyedir.
- Çok küçük kapasite değerli bir kapasitör çok daha az yük depolayacağı için şarj oluncaya kadar geçen sürede yüksek bir gerilim düşümüne sebebiyet verecek. Bu da bizim inverter girişinde elde etmemiz gereken voltaj seviyesinin boost devresinin voltaj arttırma kısıtlılığı yüzünden altında kalabilmemize sebebiyet verebilir.

3-Phase AC/DC Full-Wave Rectifier

Kapazitör Seçimi:

Bunun için Vishay firmasının 102 PHR-ST numaralı kapasitörünü devremizde kullanacağız.

Kapazitörün Teknik Dökümanları:

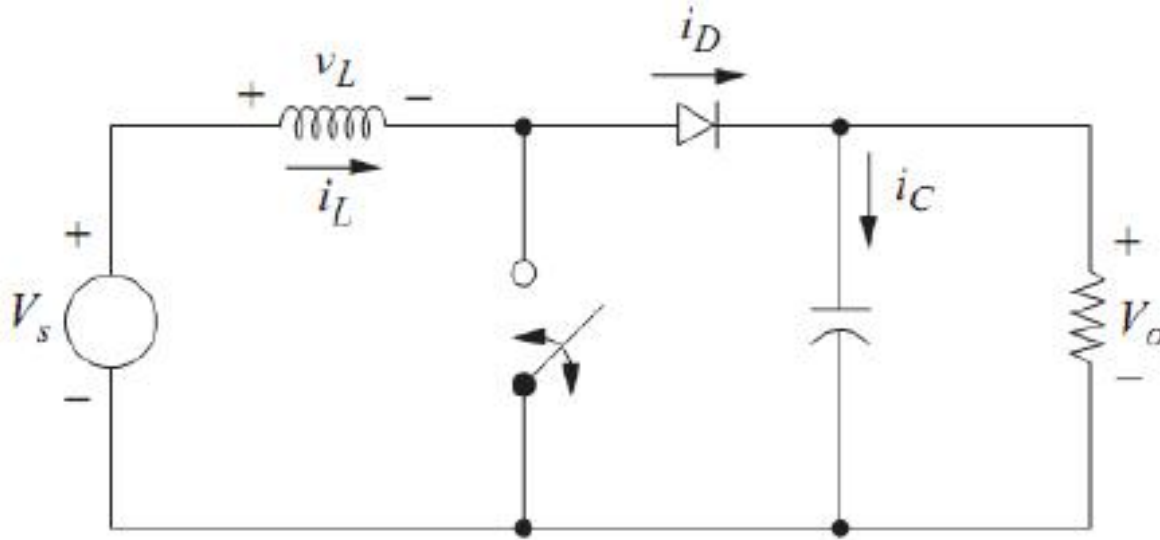
Useful life at 85 °C	10 000 h (D ≤ 50 mm) 15 000 h (D ≥ 65 mm)	10 000 h
----------------------	--	----------

Rated voltage range, U _R	25 V to 100 V	200 V to 450 V
-------------------------------------	---------------	----------------

U _R (V)	C _R 100 Hz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I _R 100 Hz 85 °C (A)	I _{L5} 5 min (mA)	ESR MAX. 100 Hz (mΩ)	Z MAX. 20 kHz (mΩ)	LIFE CODE ⁽¹⁾	ST ORDERING CODE MAL2101.....	STB ORDERING CODE MAL2101.....
	15 000	35 x 60	7.7	0.75	29	22	L1	16153E3	56153E3

Boost Dönüştürücü

- Projede inverter girişi için düşük seviyeli olan doğrultucu çıkış gerilimini yükseltmek için boost dönüştürücü kullanılacaktır.



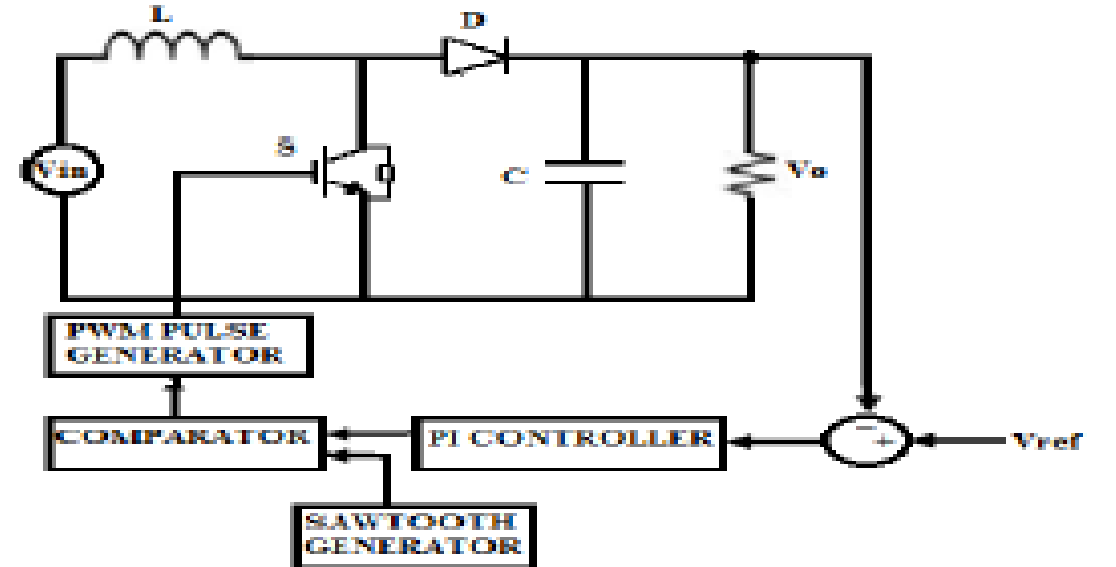
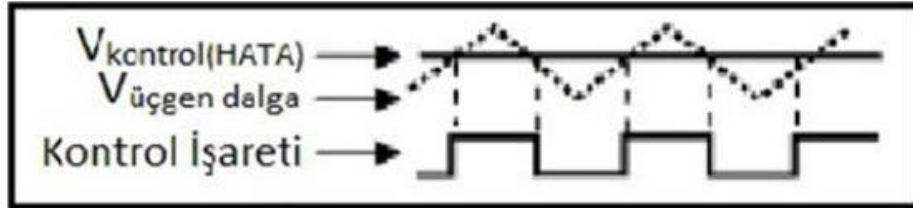
$$V_o = \frac{V_s}{1 - D}$$

$$L_{\min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f}$$

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_o / V_o)f}$$

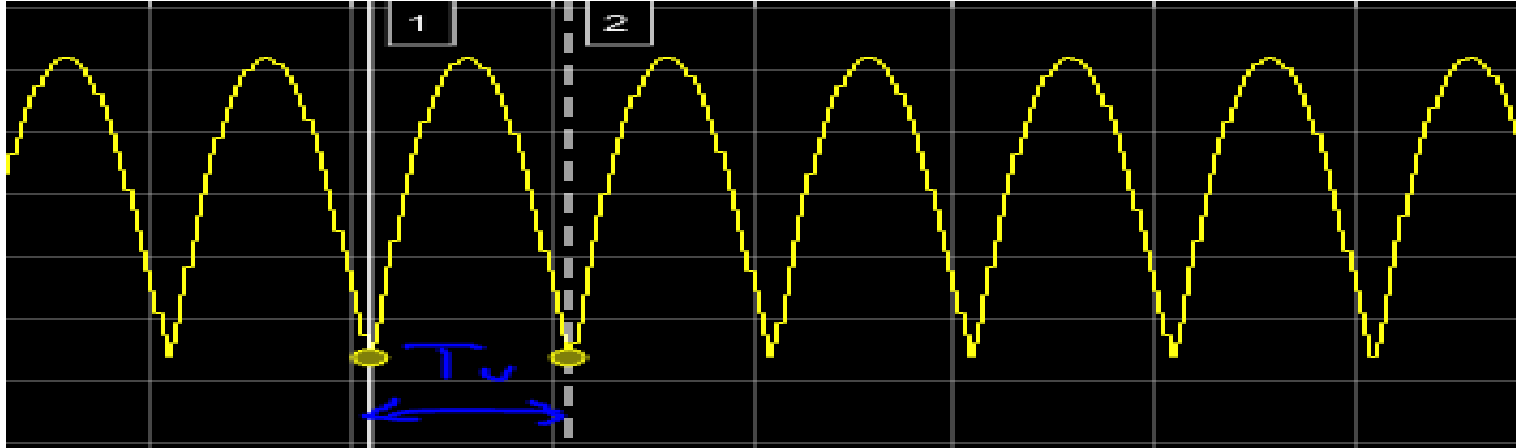
Boost Dönüştürücü

- Minimum giriş gerilimi 150V, 700V değerine yükseltilecektir.
- Sistem çıkışı 1kW için $R=490\ \Omega$.
- $V_{in}=150V$, $V_{out}=700V$ için $D=0.7857$.
- $f=10kHz$ ve %2 dalgalanma için $L=1mH$, $C=8\mu F$.
- Çıkış gerilimini 700V a sabitlemek için aşağıda şekli verilen kontrol işlemi uygulanacaktır.



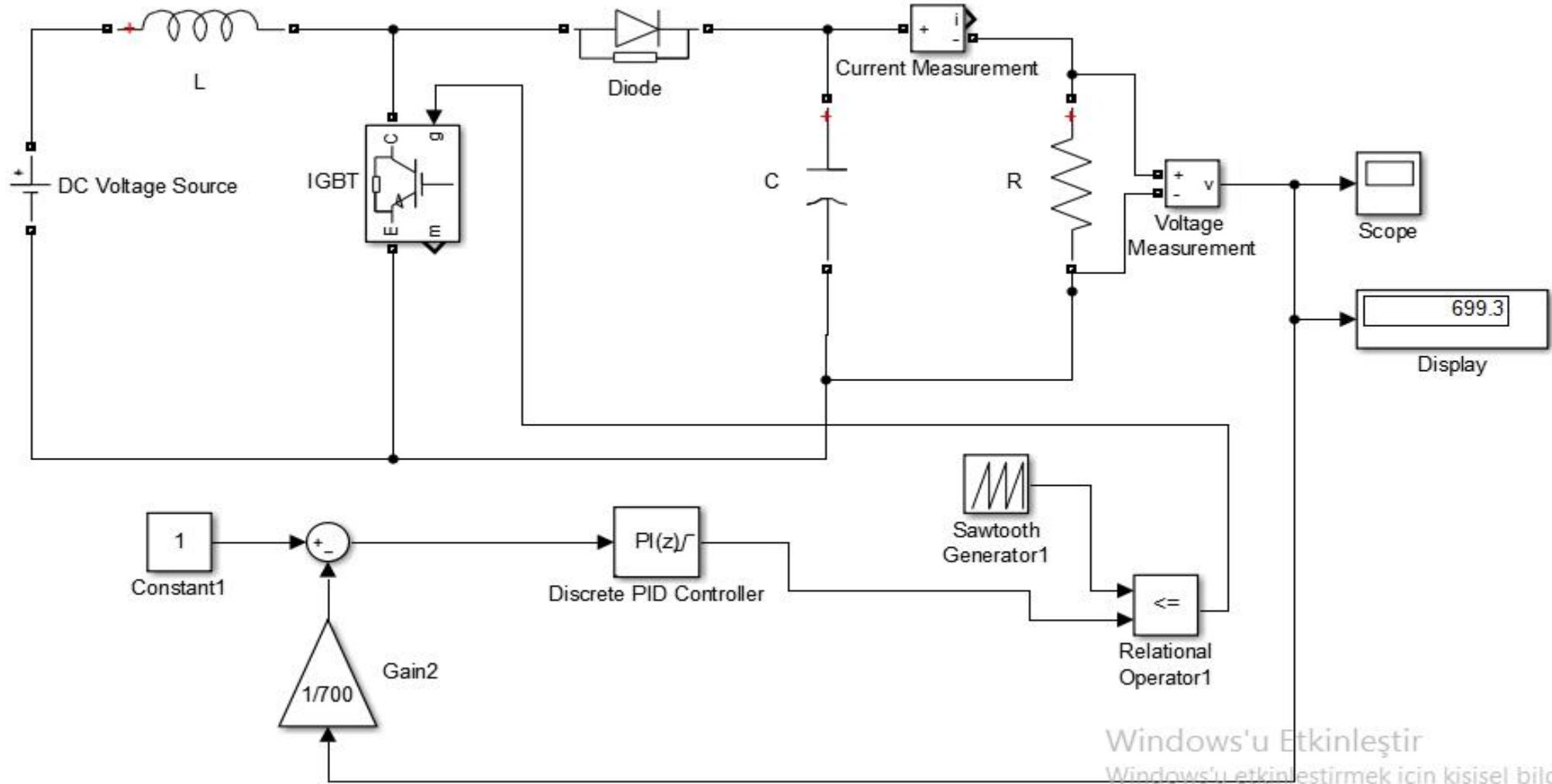
Boost Dönüştürücü

- Kontrol sinyalini elde etmek için PI denetleyici kullanılmıştır. Denetleyici parametreleri için Ziegler Nichols tuning method kullanılmıştır.
- Bu yöntemle göre önce $K_i=0$ için K_p değeri tune edilerek sistem çıkışının sürekli salınım yaptığı yer ve salınım frekansı bulunarak;
- $K_p=0.45 \cdot K_u$ ve $K_i=1.2 \cdot K_p/T_u$ formülleri ile sırasıyla 0.018, 216.



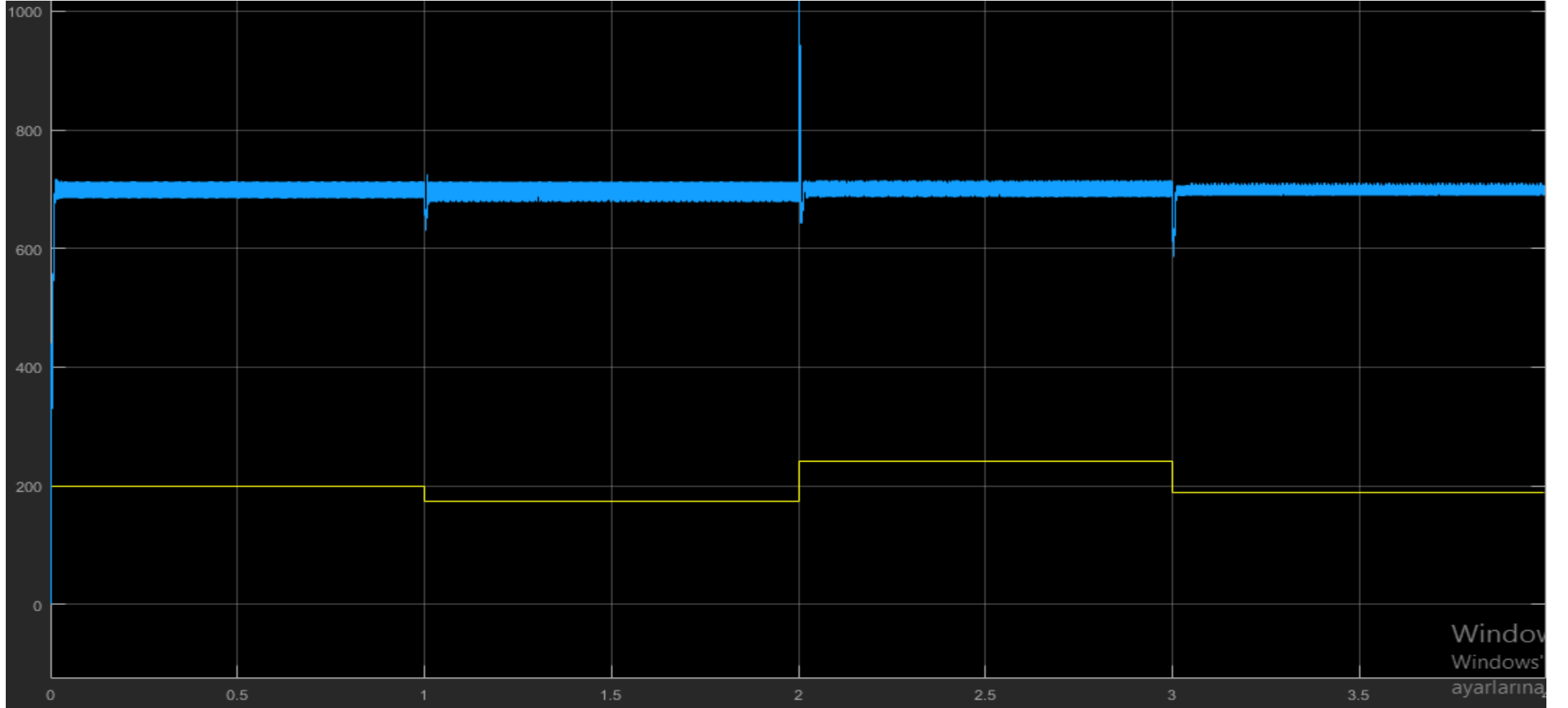
Boost Dönüştürücü

- Simulink Model:



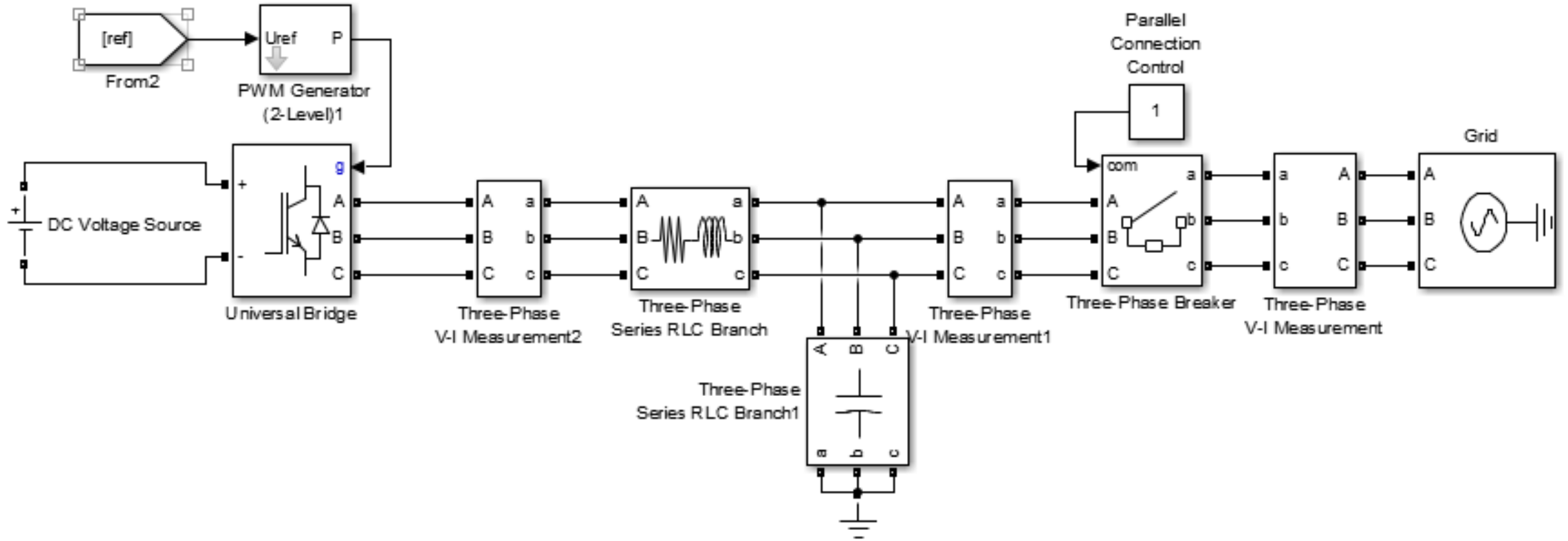
Boost Dönüştürücü

- Değişken giriş gerilimleri için çıkış gerilimi:

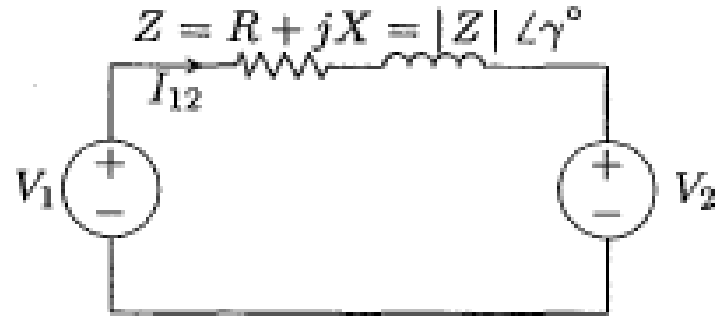


3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- Boost çıkışındaki sağlanan sabit DC gerilim şebekeye bağlanmak için PWM yöntemi ile güç kontrolü yapılarak AC ye çevrilmiştir.



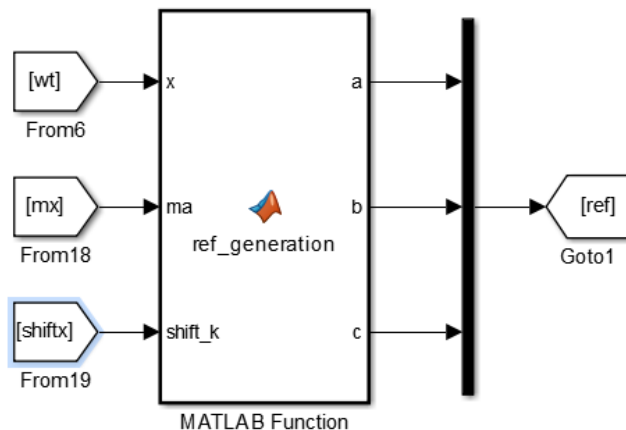
3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output



$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|}{X} [|V_1| - |V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2)]$$

İki kaynak arasındaki aktif güç akışında faz açısı, reaktif güç akışında gerilim farkları rol oynamaktadır. Faz açısı ve gerilim değerini ise PWM için üretilecek referans sinyallerinin kontrolü ile sağlanmaktadır.

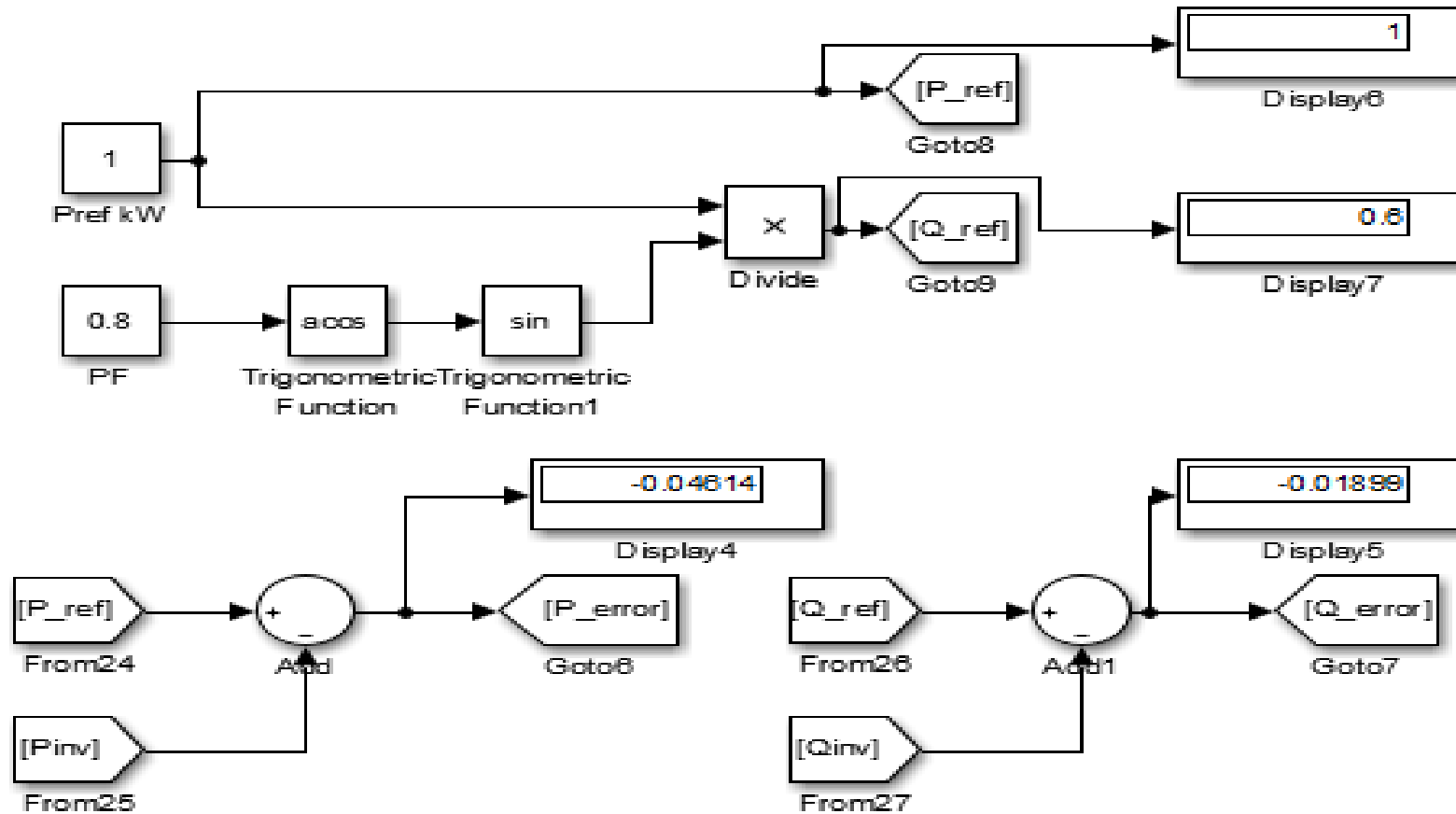


```
function [a,b,c] = ref_generation(x,ma,shift_k)

a=(ma*(sin((x)+shift_k)));
b=(ma*(sin((x)+shift_k-(2*pi/3))));
c=(ma*(sin((x)+shift_k+(2*pi/3))));
```

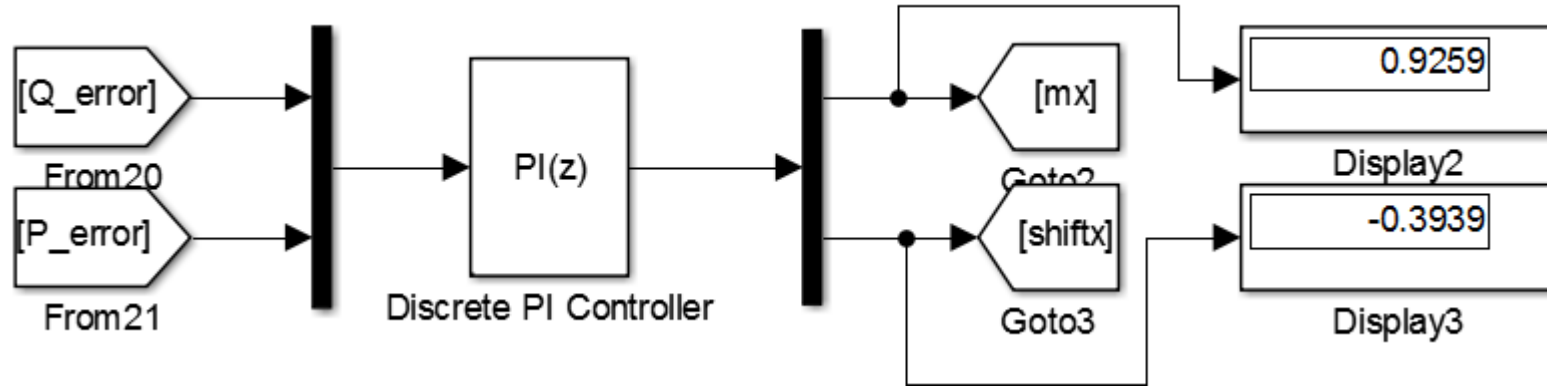
3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- Aşağıda görüldüğü gibi çıkışta istenilen aktif ve reaktif güç belirlenir ve ölçülen çıkış gücü ile karşılaştırılarak aradaki hata belirlenir.

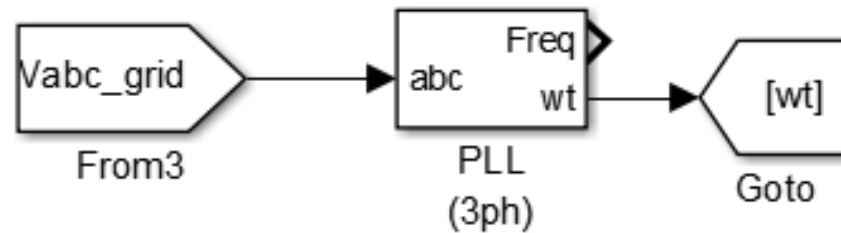


3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- Bu hatalar PI denetleyici yardımıyla kontrol edilerek modülasyon indeksi ve faz kayması belirlenmektedir.

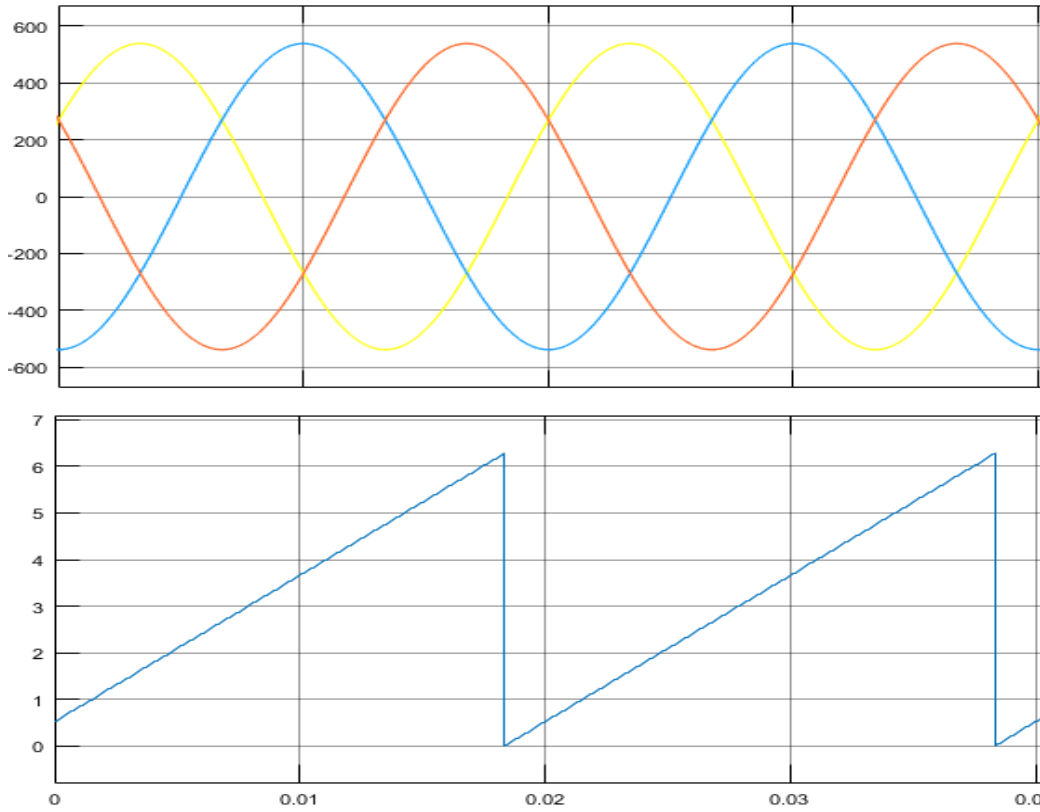


- İnverter çıkışının şebeke ile senkronize olması için ise şebeke faz bilgisi gerekmektedir. Bunu için PLL yöntemi kullanılmıştır.

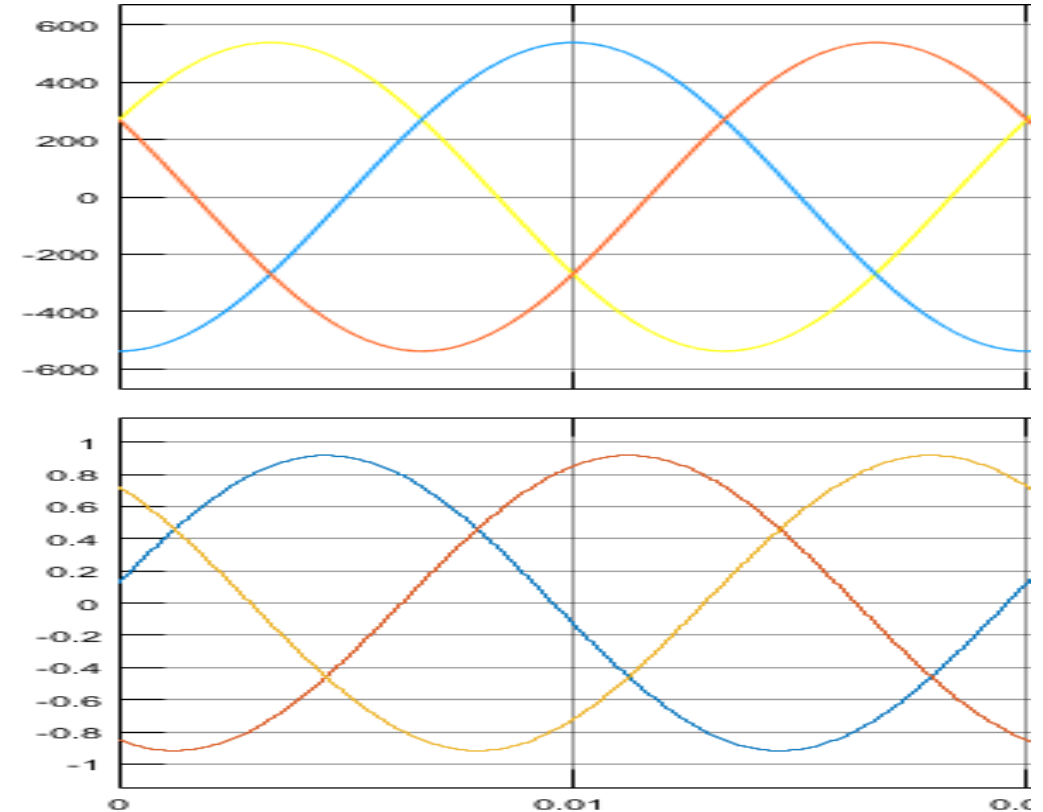


3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- PLL ile elde edilen faz bilgisi:



- Oluşturulan referans sinyalleri:



3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- Harmonikleri yok etmek için LC alçak geçiren filtre kullanılmıştır.

$$f_c < \frac{1}{10} f_{sw}$$

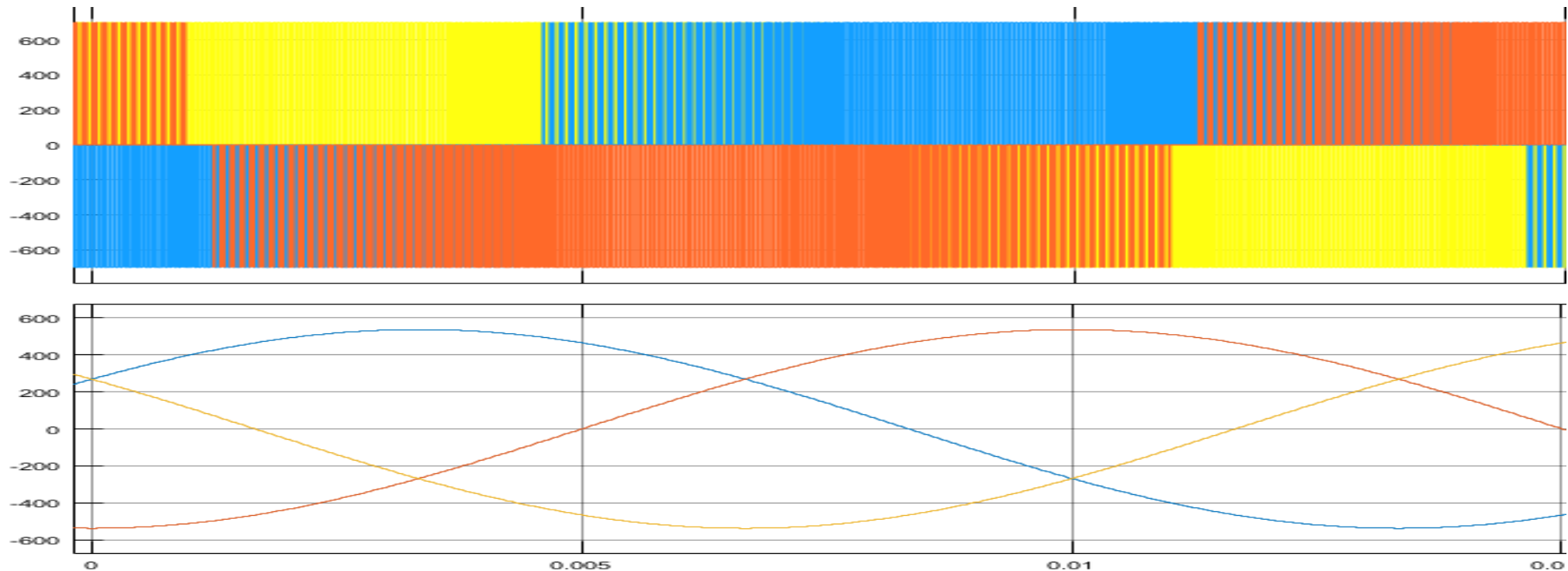
Cut-off frequency

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$f_{sw}=10\text{kHz}$ için,

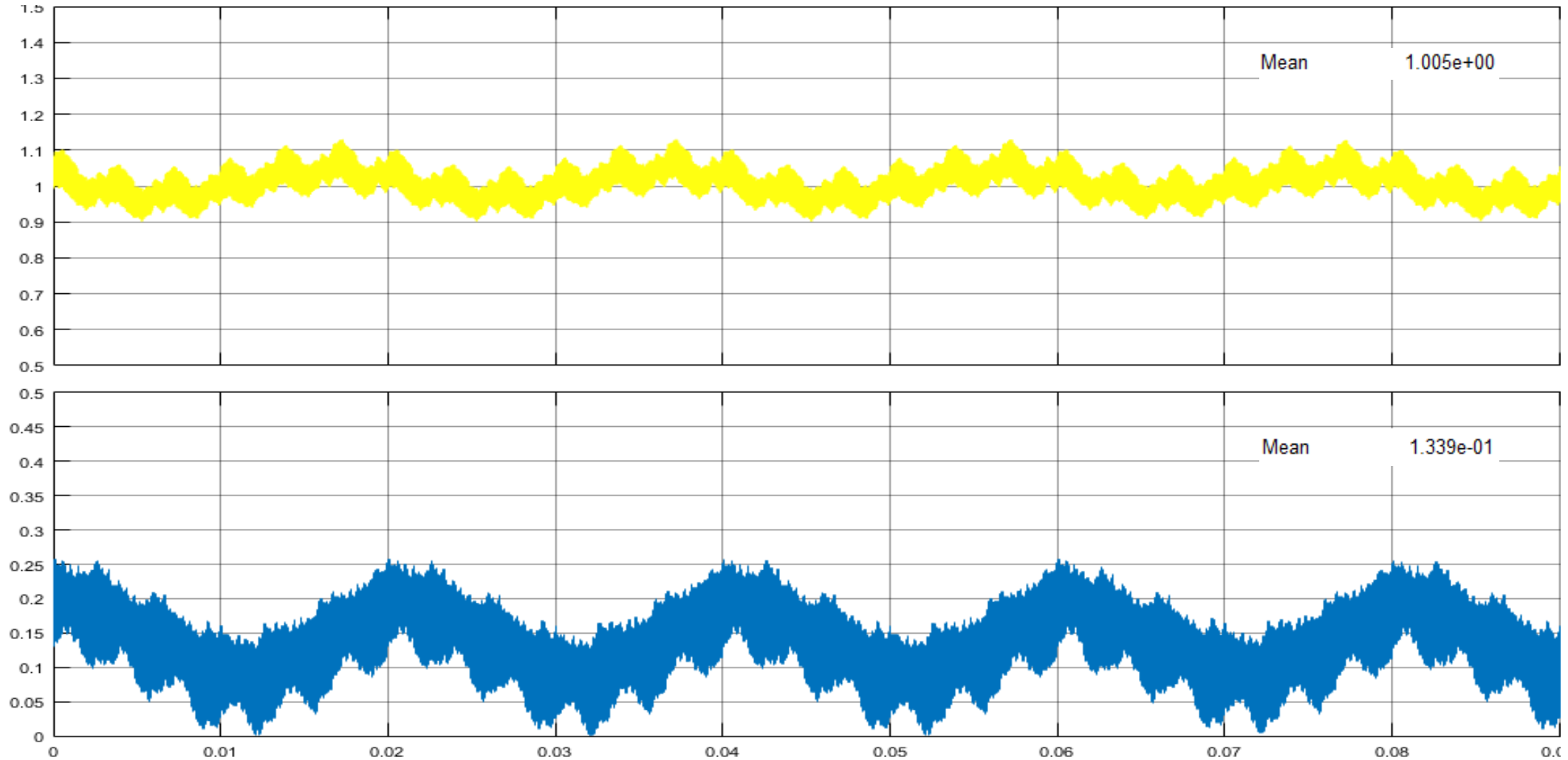
$f_c=707\text{Hz}$ seçilerek;

$L=92\text{mH}$ ve $C=0.55\mu\text{F}$ bulunmuştur.



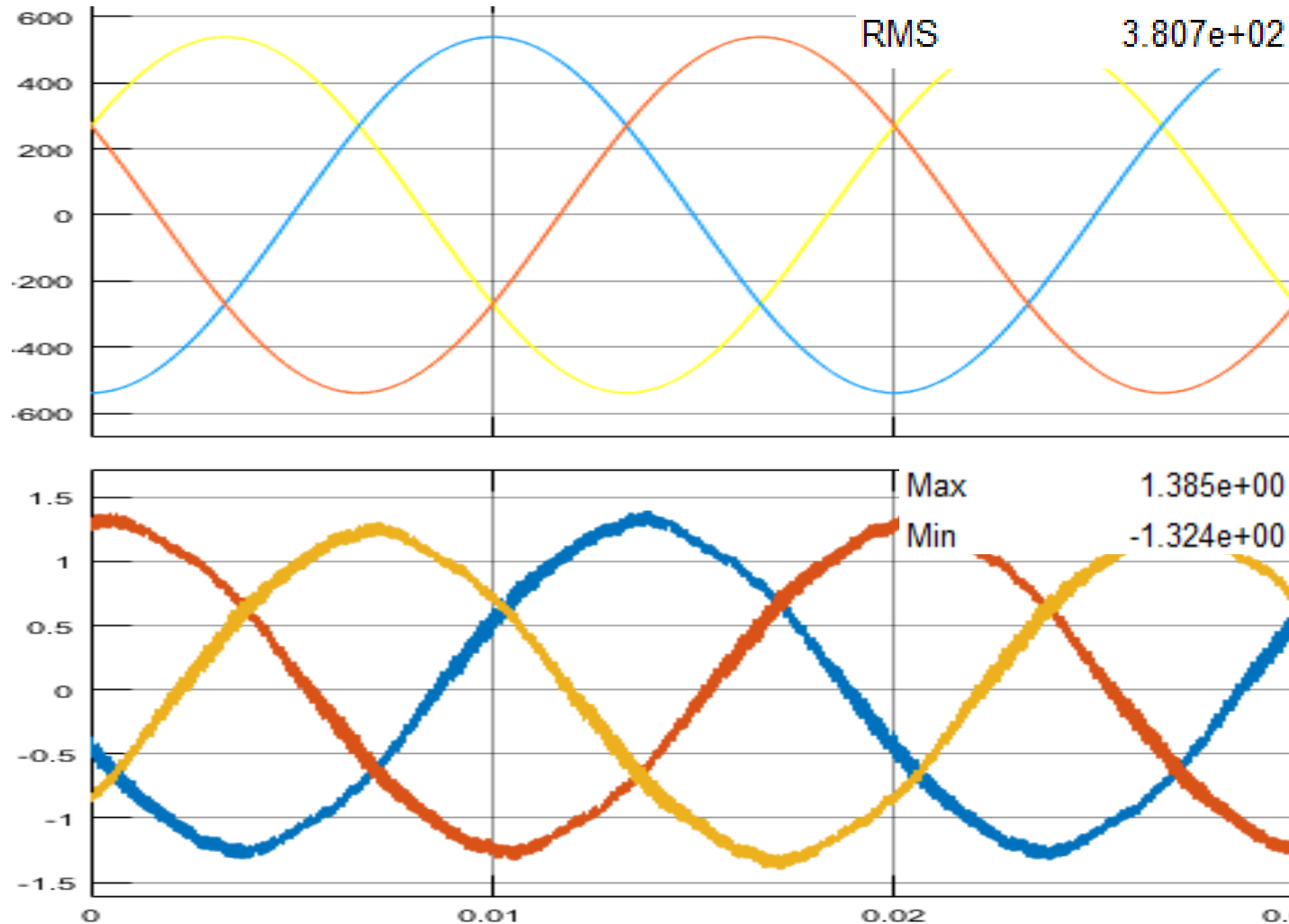
3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- 1kW aktif güç ve 0.99 PF çıkış istendiğinde çıkış P ve Q grafiği;

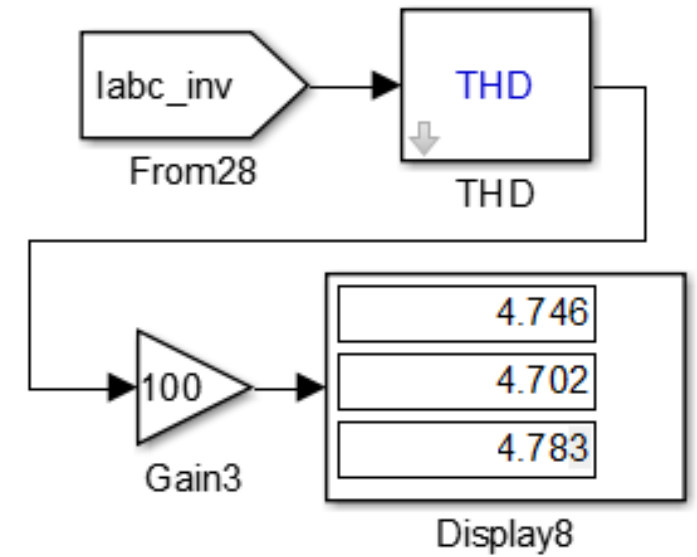


3-Phase DC/AC Inverter With PWM Output

- Çıkış faz-faz gerilim ve akım grafiği;

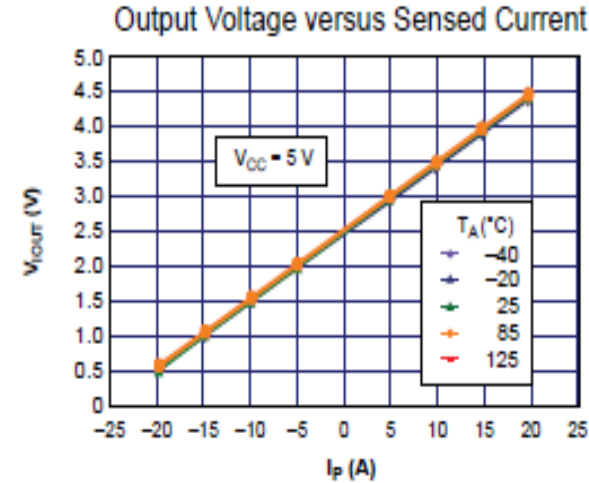
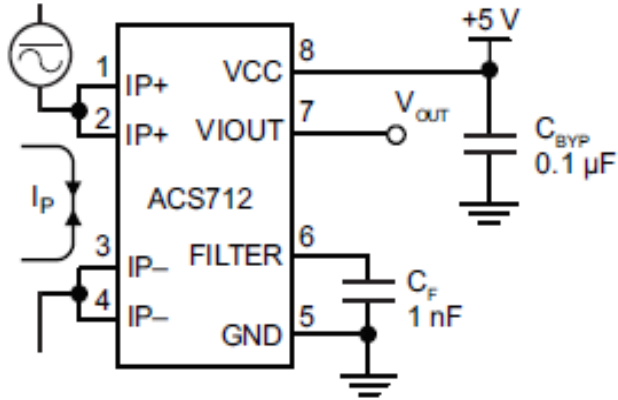


- total harmonic distortion;

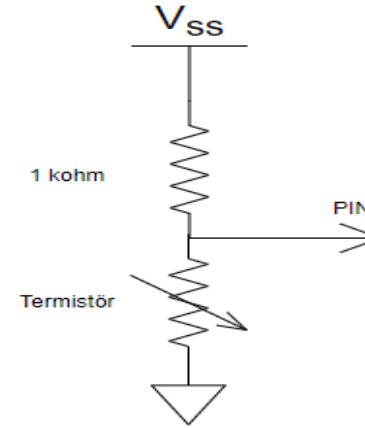
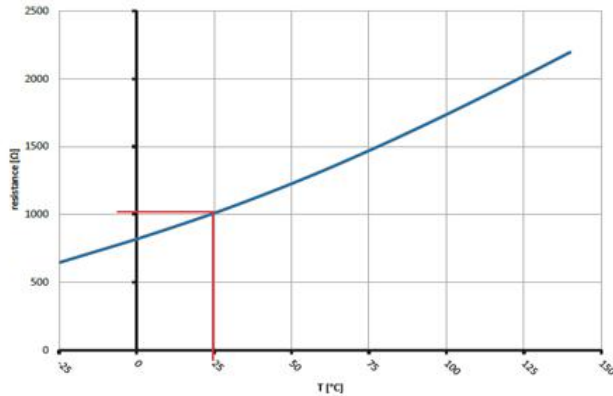


Komponent Seçimi

Akım Sensörü: Allegro MicroSystems, “ACS712” akım sensörü seçilmiştir. Sensör hall etkisi yöntemini kullanarak ölçüm yapmakta, 5V besleme gerilimi ile ve $-40^{\circ}/85^{\circ}$ aralığındaki sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Sensör çıkış olarak -20A / 20A akım aralığına karşılık 0.5 / 4.5V gerilim vermektedir. Sensörün devre şeması aşağıda verilmiştir. Histerezis kontrol için her bir faz akım değeri ölçülmelidir ve bundan dolayı üç adet akım sensörüne ihtiyaç duyulur. İnverter çıkışından akım ölçülerek güç kontrolü sağlanmak üzere değerler alınır.



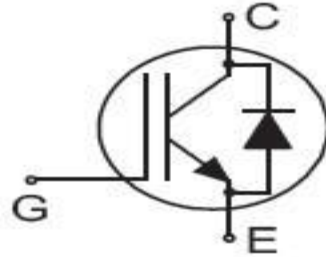
Sıcaklık Sensörü: Sistemimizde çalışan bütün komponentler sıcaklık artışından dolayı etkilenmektedir. Bunu engellemek adına sistemimizde toplamda 2 adet “CANTHERM Canadian Thermostats & Control Devices, Ltd.” firmasının “STS2” kodlu termistörünü kullandık. Birinci termistörü motorun stator sargılarına yakın bir konuma yerleştirerek motorun içindeki sıcaklığı ölçerek motorun rotorunda bulunan mıknatısları demagnetizasyona uğramasını engellemekdir. Ayrıca motorun statorunda bulunan koruyucu vernik eriyerek kısa devreye sebebiyet verebilir. İkinci mıknatısın konumu ise Boostun içinde bulunan diyotun üzerine yerleştirmektedir. Çünkü diğer yarı-iletkenlerden farklı olarak boost diyodu daha uzun süre ve daha büyük değerlerde akım geçirmektedir. Mıknatısın datasheetinden alınan sıcaklık direnç grafiği görselde ki gibidir.



IGBT: Inverter için IGBT akımı olan 1.5A ve boost üzerindeki IGBT üzerinden geçen 14A Akımı sağlayan IHW30N135R5 modeli seçilmiştir.

Key Performance and Package Parameters

Type	V_{CE}	I_C	$V_{CEsat}, T_{vj}=25^{\circ}C$	T_{vjmax}	Marking	Package
IHW30N135R5	1350V	30A	1.65V	175°C	H30PR5	PG-TO247-3

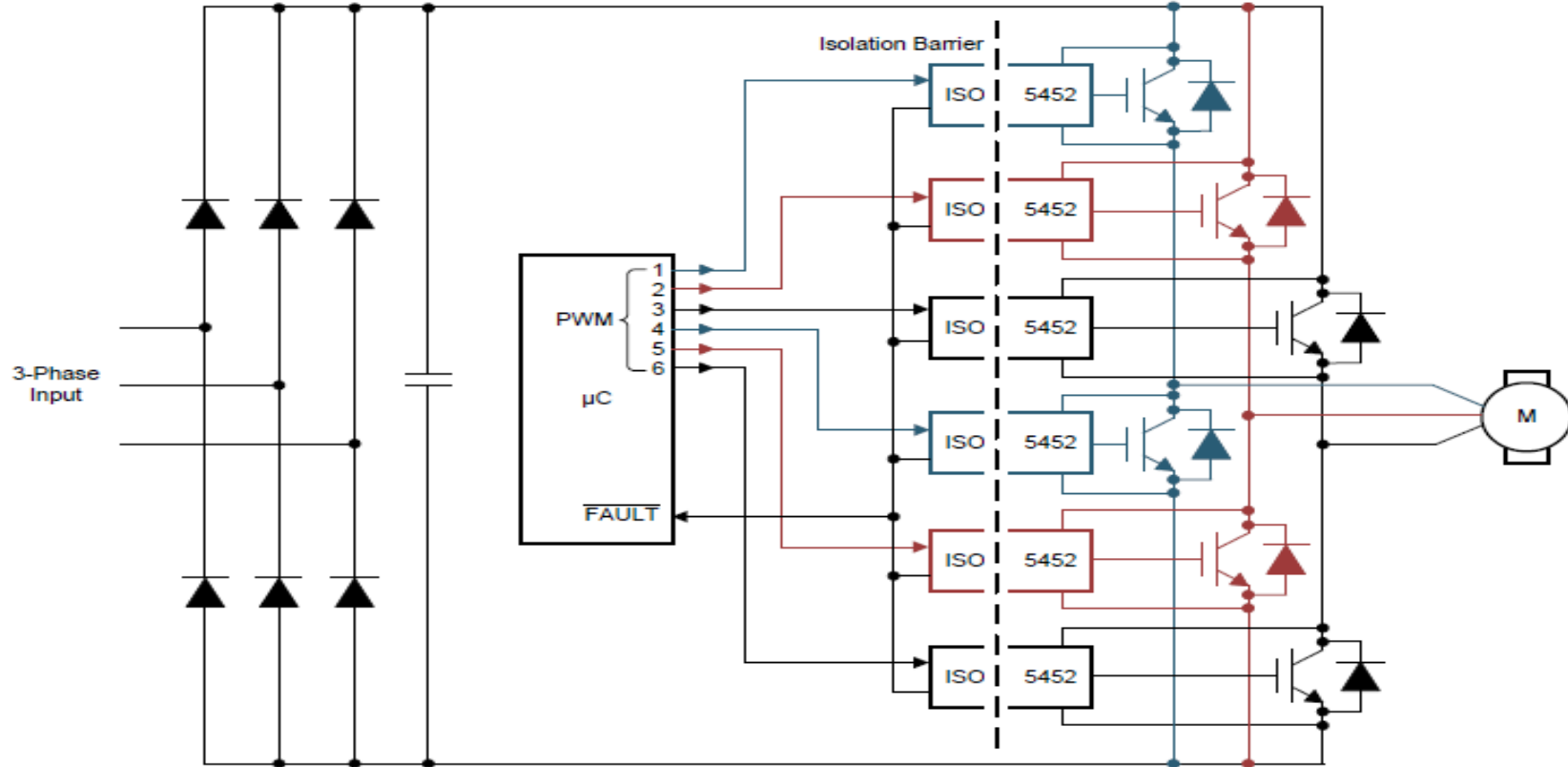


Diode: Sistemimizin voltajı olan 170V ve akım değeri 6A olan değerleri karşılayan BYR29X-800 modülü seçilmiştir.

Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Unit
V_R	reverse voltage	DC		-	-	800	V
$I_{F(AV)}$	average forward current	$\delta = 0.5$; $T_h \leq 73\text{ }^{\circ}\text{C}$; SQW; Fig. 1 ; Fig. 2 ; Fig. 3	[1]	-	-	8	A
Dynamic characteristics							
t_{rr}	reverse recovery time	$I_F = 1\text{ A}$; $V_R = 30\text{ V}$; $di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$; $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; Fig. 6 ; Fig. 7		-	60	75	ns

Kapı Sürücü: Projemizde 3 fazlı evirici devresi için 6 adet PWM sinyali ve her biri için kapı sürücü devresi gerekmektedir. 1 tane de boost devresinde bulunan IGBT için kullanılmıştır. Sürücü devreleri incelendiğinde projemiz için ISO5452 modülü modülü uygun görülmüştür.

Typical Applications



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Figure 48. Typical Motor Drive Application

Komponent	Parça No.	Birim Fiyat(€)	Adet				
IGBT	IHW30N135R5	3,00	7				
Kapı Sürücü	ISO5452	4.5	7				
Diyot	BYR29X-800	5,96	7				
Kapasitör	Vishay 102 PHR-ST	40	1				
İndüktör			1				
Toplam		134,22					

Toplam Maliyet:

- Toplam devremizin jeneratoremizin maliyeti yaklaşık 1600 liradır.(Yapı,İşçilik, Bakım ve Vergiler dahil değildir.Çelik maliyeti bakır maliyeti malzemelerin maliyeti dahil)
- Yıllık ortalama Söke de 7.5 m/s hızla esen rüzgar hızı için bir yılda üretebileceğimiz elektrik değeri 3670 liradır.
- Yaklaşık 7 ayda amorti ediyor.