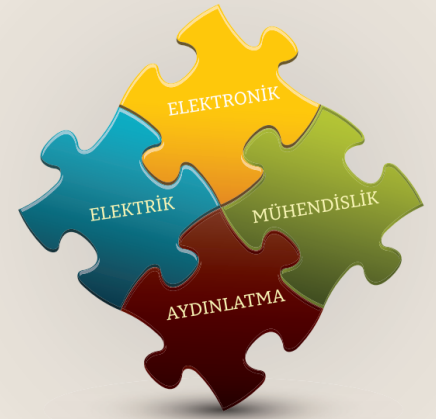


# **VI. ELEKTRİK TESİSAT ULUSAL KONGRE ve SERGİSİ**



## **TEK FAZLI İNVERTER KAYNAK MAKİNALARI İÇİN SAYISAL PI DENETLEYİCİ TASARIMI**

**Hulusi Özkan<sup>1</sup>, Mustafa Aslan<sup>1</sup>, Barış Tuğgan<sup>2</sup>, Mutlu Boztepe<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,

<sup>2</sup>Magma Mekatronik Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş.

**IV. GÜÇ VE ENERJİ SİSTEMLERİ SEMPOZYUMU  
16-19 Ekim 2019, İzmir**

# İÇERİK

---

- Motivasyon
  - Kaynak Makineleri ve kaynak karakteristiği
  - Sistemin modellenmesi
  - Transfer fonksiyonunun elde edilmesi
  - PI denetleyici tasarımı
  - PSIM simulasyonu
  - Akım Ölçme Yöntemleri
  - PI denetleyicisinin sayısal olarak gerçekleştirilmesi
  - DeneySEL çalışmalar
  - Sonuç
-

# MOTİVASYON

---

- Sayısal kontrol yöntemlerinin, analog kontrol yöntemlerine göre programlanabilirlik, esneklik ve adaptif parametre ayarlama vb. gibi önemli avantajları bulunmaktadır.
- Bu çalışma da 6 kVA gücünde bir kaynak makinesinin kontrol transfer fonksiyonlarının elde edilmesi ve mikroişlemci ile sayısal olarak kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır
- Bu çalışma üniversite-sanayii işbirliği kapsamında sanayi destekli bitirme projesi olarak 2018-2019 öğretim yılında Magma Mekatronik Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

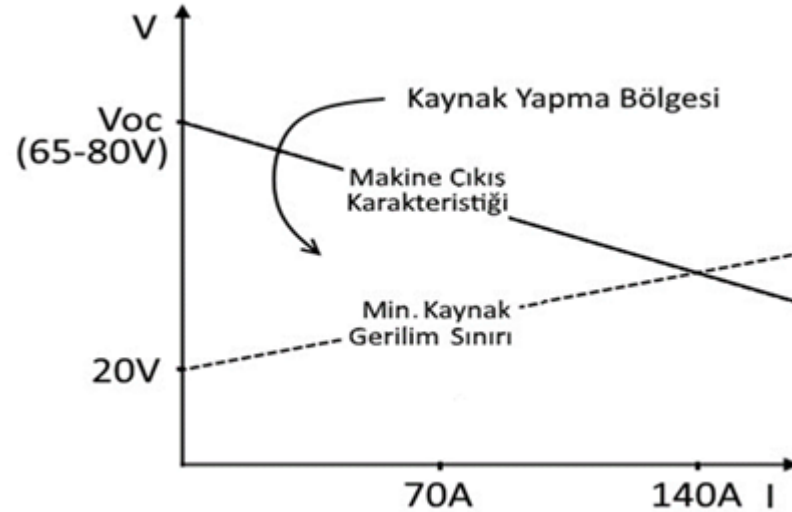


# KAYNAK MAKİNELERİ

- Elektrik ark kaynağı metalleri birleştirmek için kullanılan bir 'Eritme Kaynağı' tekniğidir.
- Kaynak esnasında açığa çıkan enerjinin:
  - %85'i ısı
  - %15'i ışıkolarak ortaya çıkar.
- İnverter kaynak makinelerinin, transformatörlü kaynak redresörlerine göre;
  - Daha hafif olmaları
  - Çok farklı tipte elektrot kullanabilmeleri
  - Akım ayarlarının hassas yapılabilmesigibi avantajları vardır.



# KAYNAK I-V KARAKTERİSTİĞİ

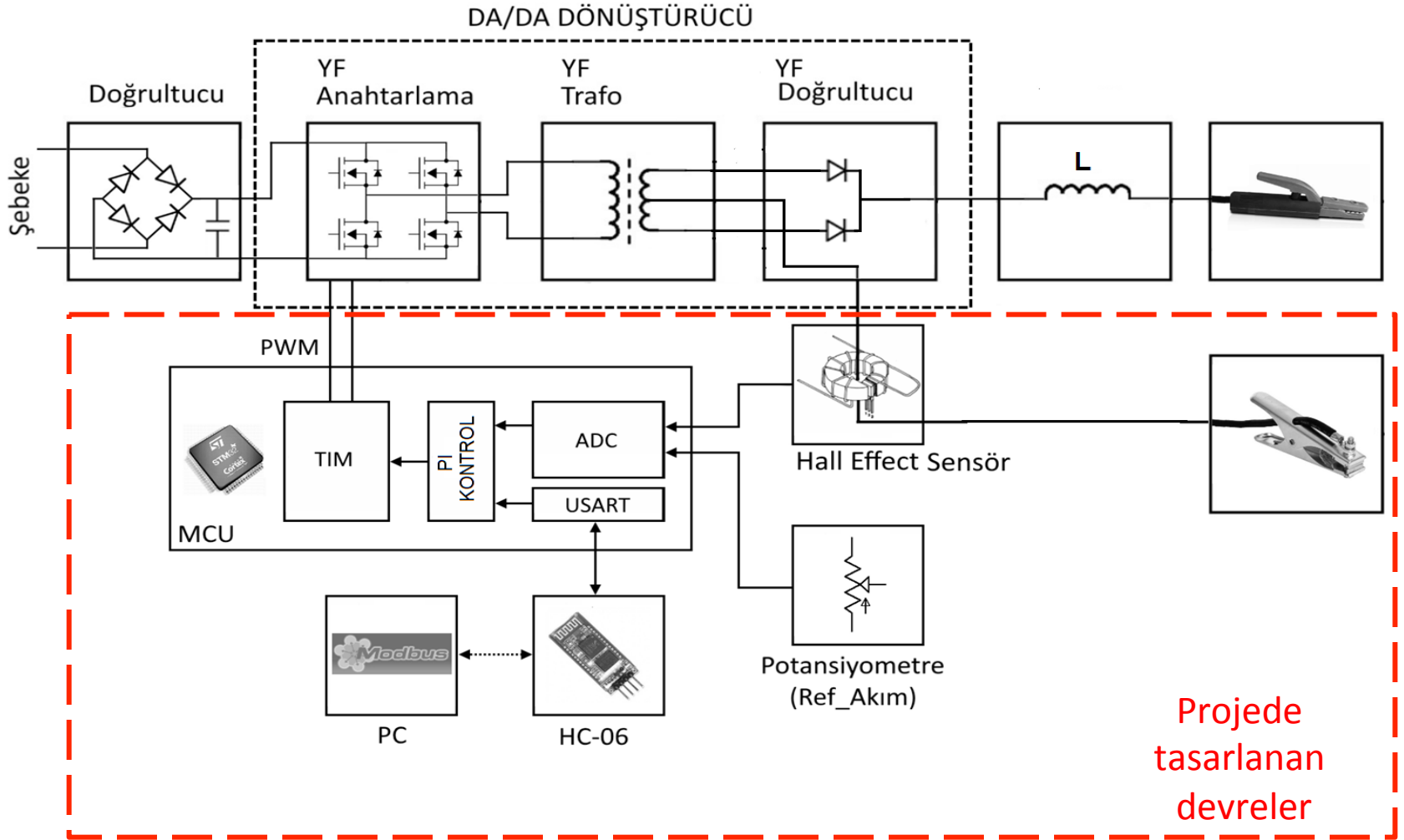


- Kaynak makinesinin minimum çıkış gerilimi ( ve dolayısıyla min. çıkış gücü) EN 60974-1 standartı tarafından şu şekilde belirlenmiştir.

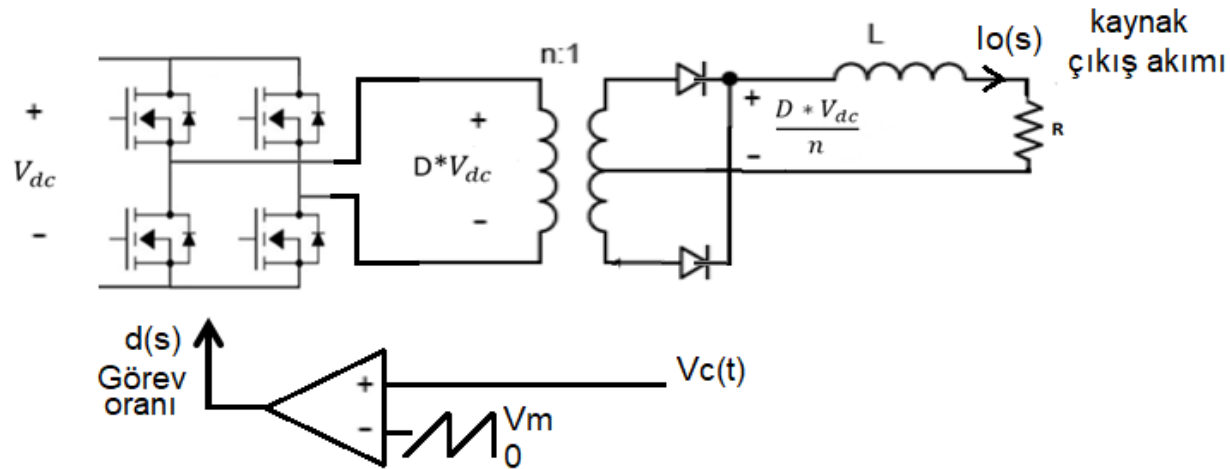
$$V_{kaynak} = 20 + 0.04 * I_{kaynak}$$

**Örnek:** Kaynak akımı 100A olduğunda çıkış terminaline bulunması gereken gerilim  $V_{kaynak} = 24V$  ve minimum çıkış gücü 2.4kW olur.

# KAYNAK MAKİNESİ BLOK DEVRE ŞEMASI

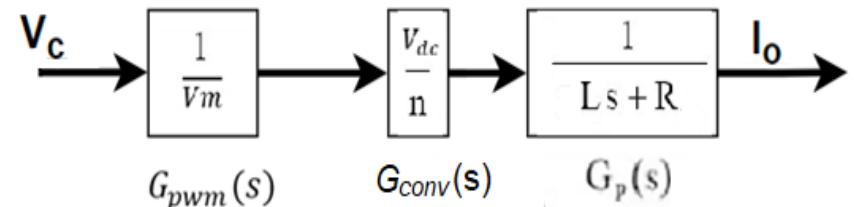


# DÖNÜŞTÜRÜCÜ TRANSFER FONKSİYONUNUN ELDE EDİLMESİ



- Kontrol sinyalinden kaynak çıkış akımına olan transfer fonksiyonu

$$\frac{I_o(s)}{V_c(s)} = \frac{V_{dc}}{nV_m} \frac{1}{sL + R}$$



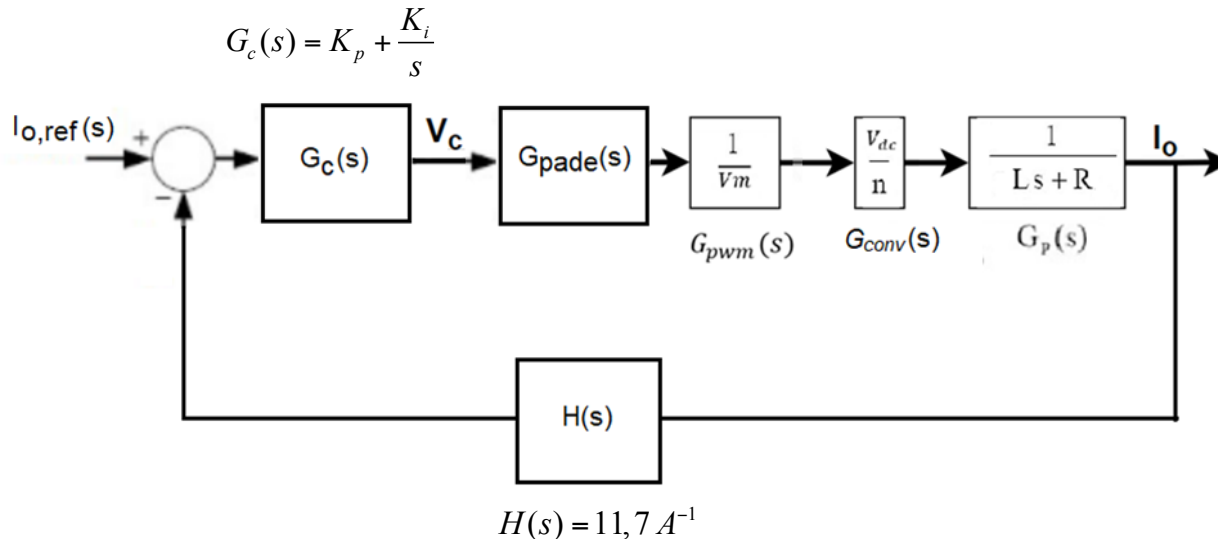
# KAPALI ÇEVİRİM T.F. ELDE EDİLMESİ

- Sayısal kontrolde örneklemeden kaynaklanan gecikme Pade yaklaşımı ile modellenenabilir.

$$G_{pade}(s) = \frac{1 - s(T/2)}{1 + s(T/2)}$$

burada T örnekleme zamanıdır.

- Akım sensörünün kazancı  $H(s)$  ve PI denetleyici  $G_c(s)$  de eklendiğinde kapalı çevrim sistem elde edilir.



*Parametreler:*

$$V_{dc} = 300V$$

$$V_m = 1400$$

$$L = 9.4 \mu H$$

$$n = 5 \quad R = 25.4V /$$

$$140A$$

$$= 0.182\Omega$$



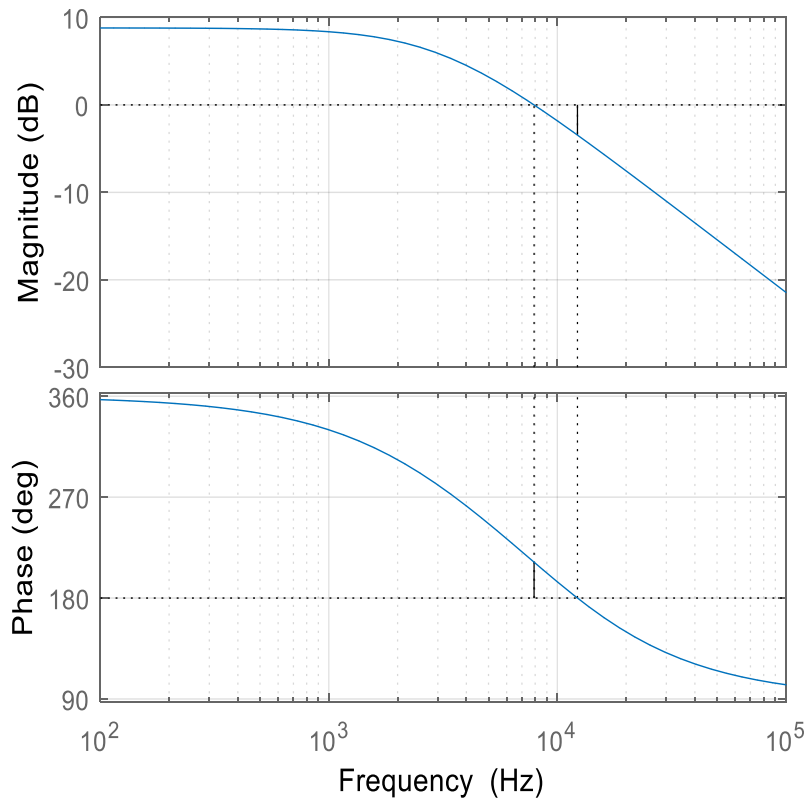
# PI DENETLEYİCİ TASARIMI

## Kompanze edilmemiş sistem

$$G_c(s)=1$$

Bode Diagram

Gm = 3.45 dB (at 1.22e+04 Hz) , Pm = 32 deg (at 7.91e+03 Hz)

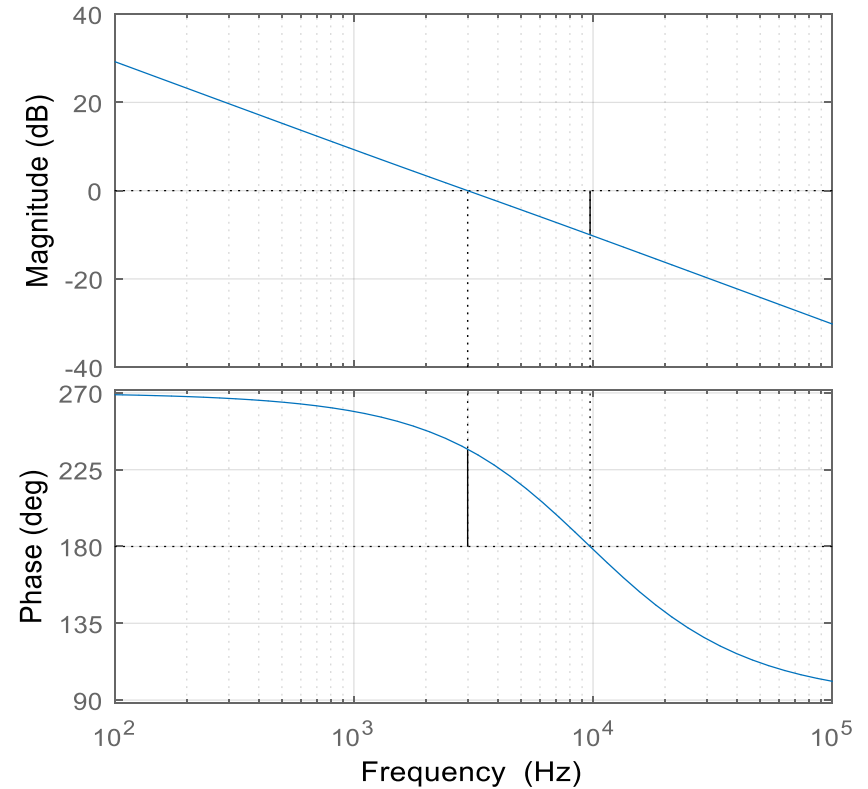


## Kompanze edilmiş sistem

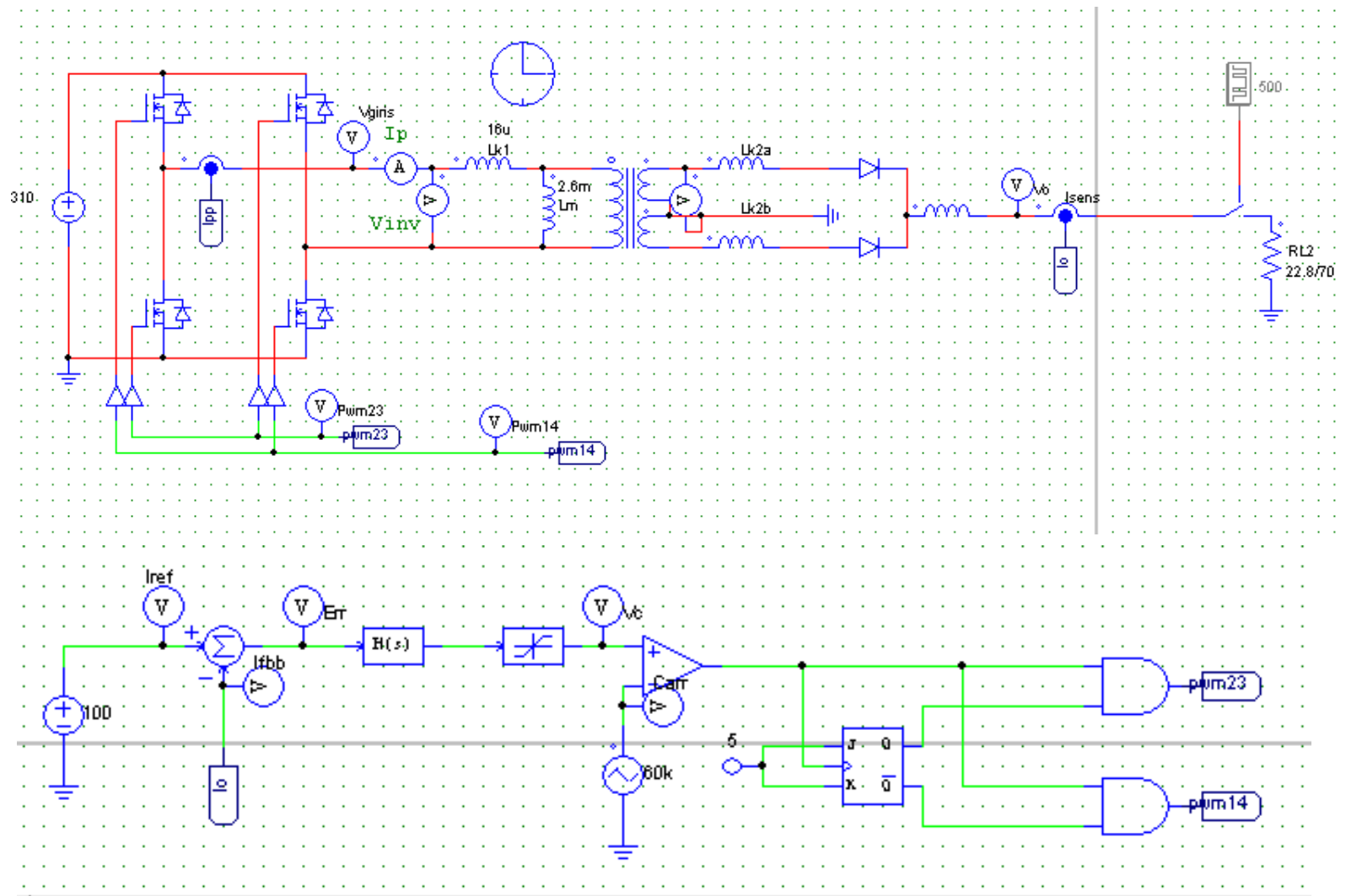
$$G_c(s) = 0,3634 + \frac{6608}{s}$$

Bode Diagram

Gm = 10 dB (at 9.72e+03 Hz) , Pm = 57 deg (at 2.99e+03 Hz)



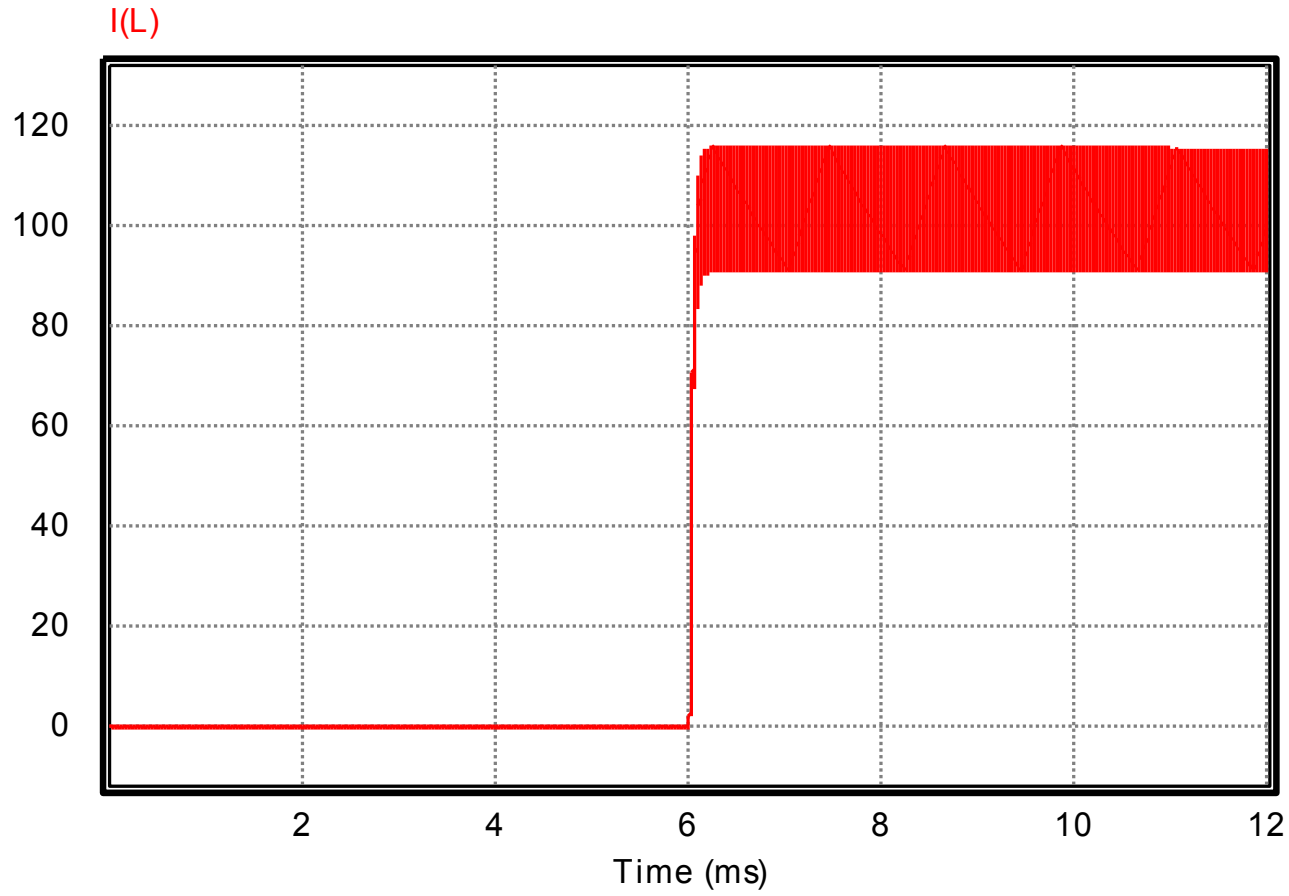
# PSIM BENZETİMİ



# PSIM BENZETİMİ

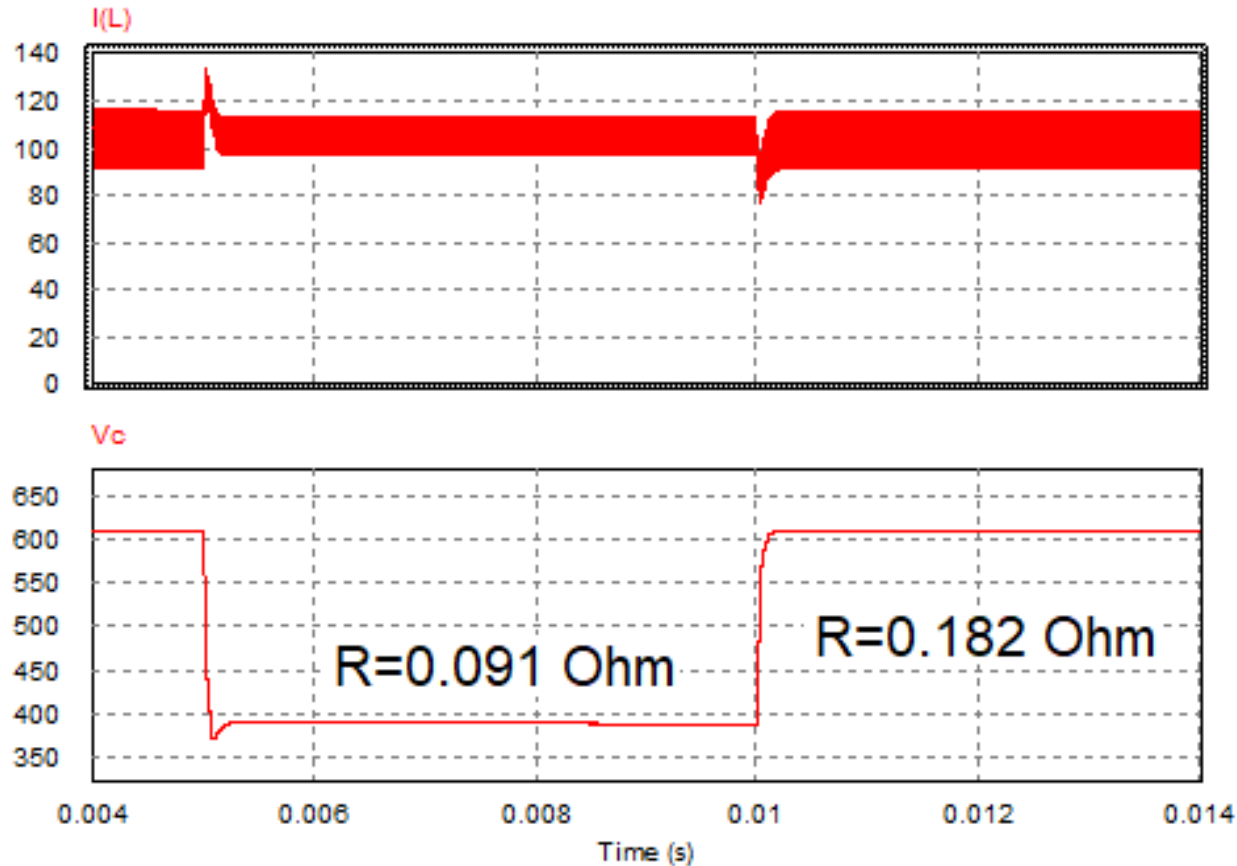
---

- Basamak cevabı



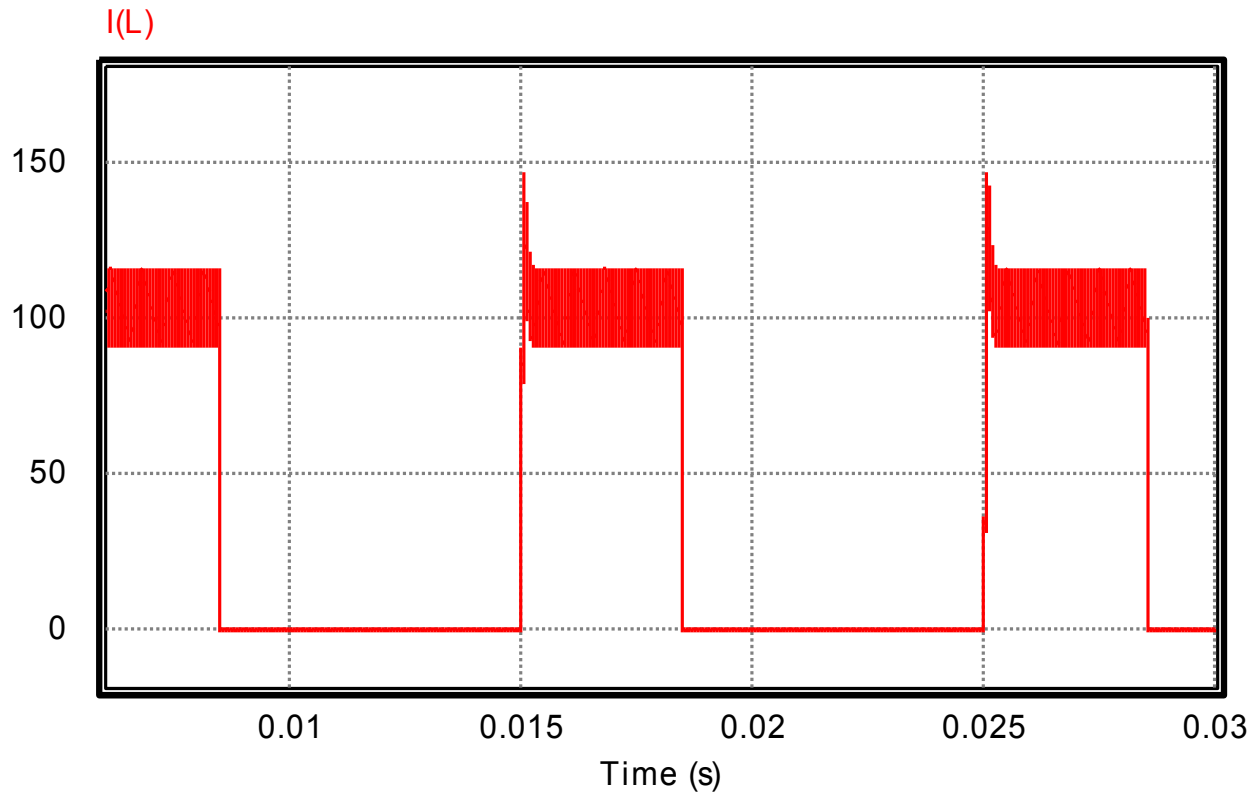
# PSIM BENZETİMİ

- Yük değişimlerine ( $R=182\text{ m}\Omega$  ve  $R=91\text{ m}\Omega$ ) karşı verilen dinamik cevap

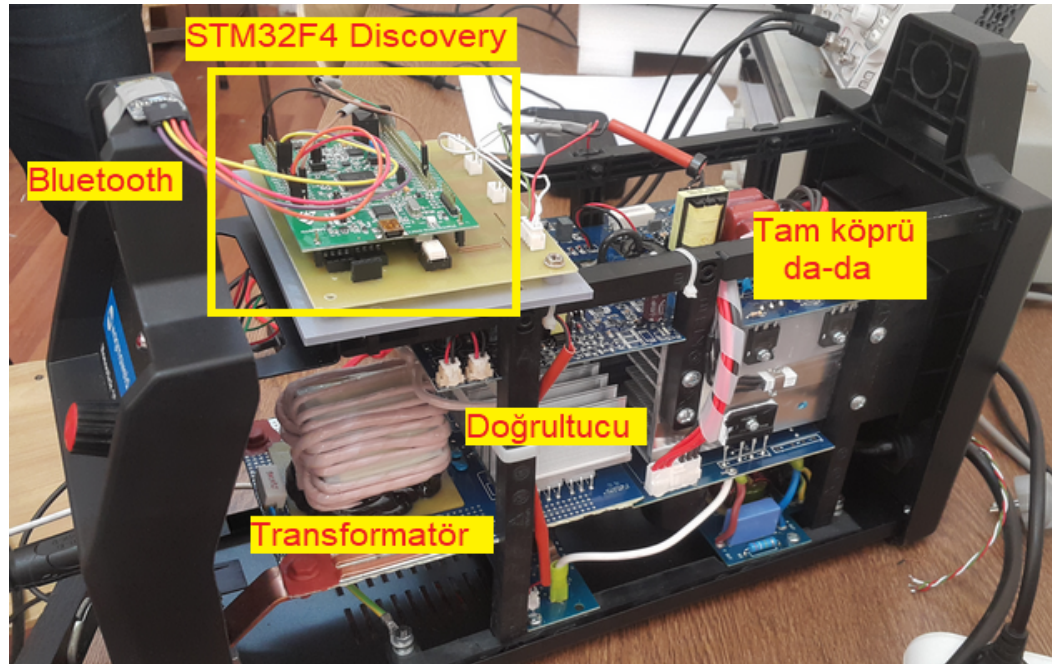


# PSIM BENZETİMİ

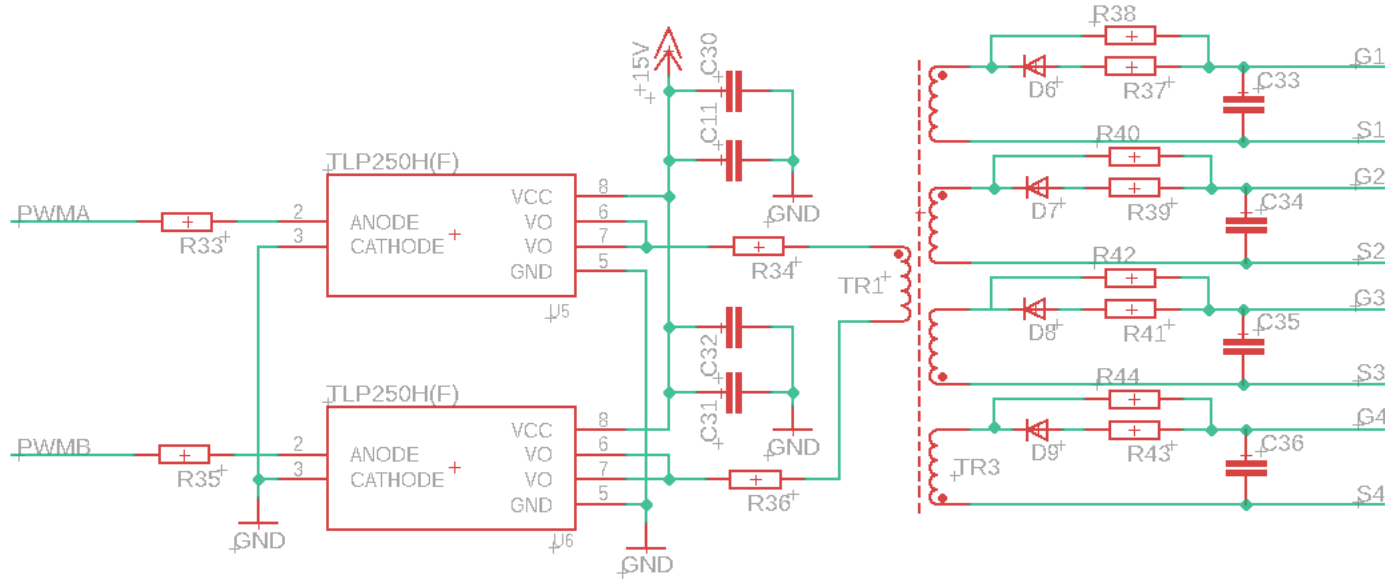
- Çıkış akımının "kısa devre" - "açık devre" geçişlerindeki cevabı



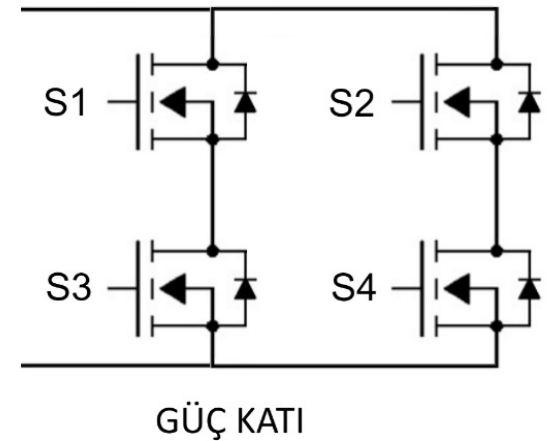
# DENEYSEL ÇALIŞMALAR



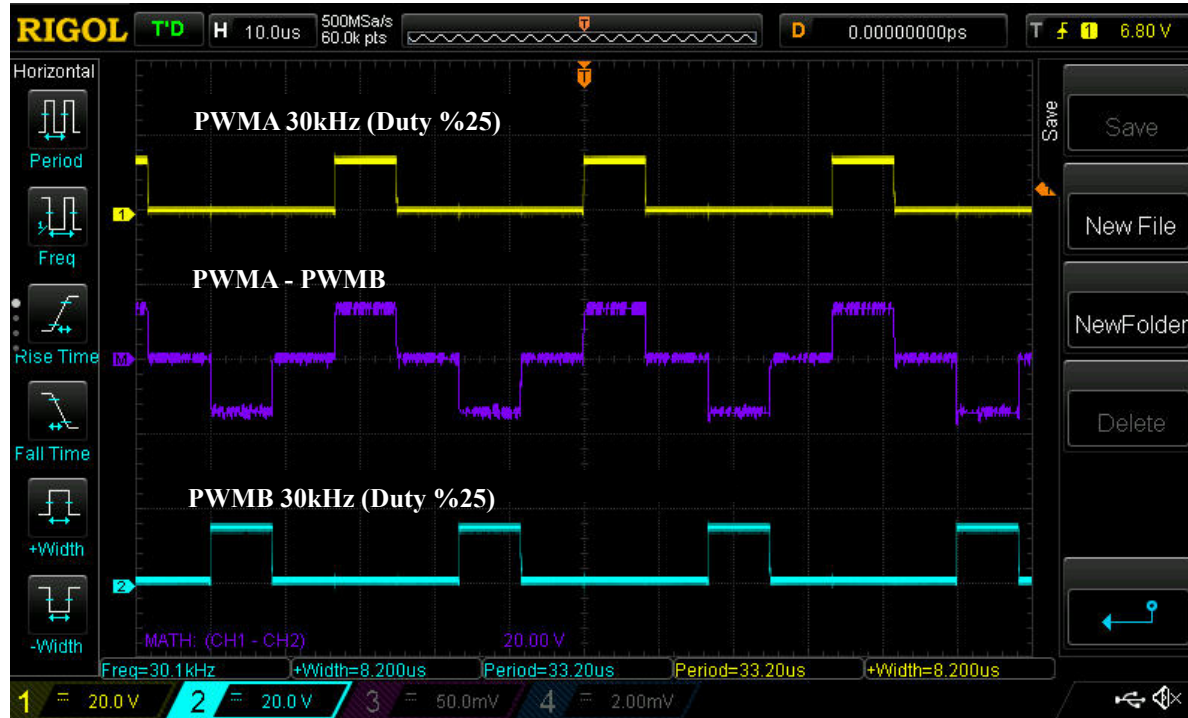
# KAPI SÜRME DEVRESİ



- Pulse trafosu sarım oranı 1:1:1:1:1
- Pulse trafosu aynı zamanda kontrol devreleri ile güç katının izolasyonunu sağlamaktadır



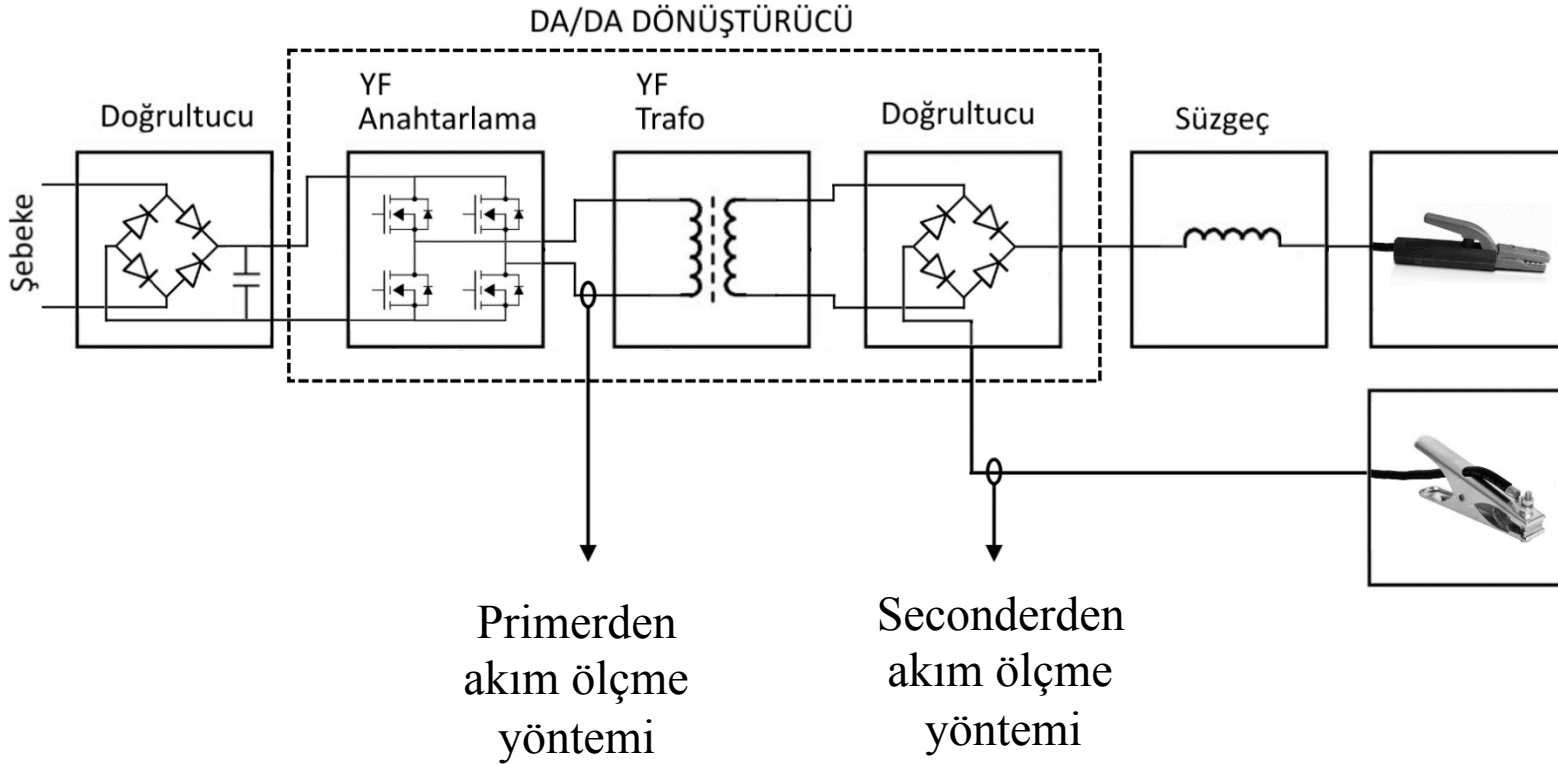
# PWM-A ve PWM-B sinyalleri



- Pulse trafosunun çıkışı IGBT anahtarlara uygulanır.
- PWM görev oranı değiştirilerek çıkış akımı kontrol edilebilmektedir.

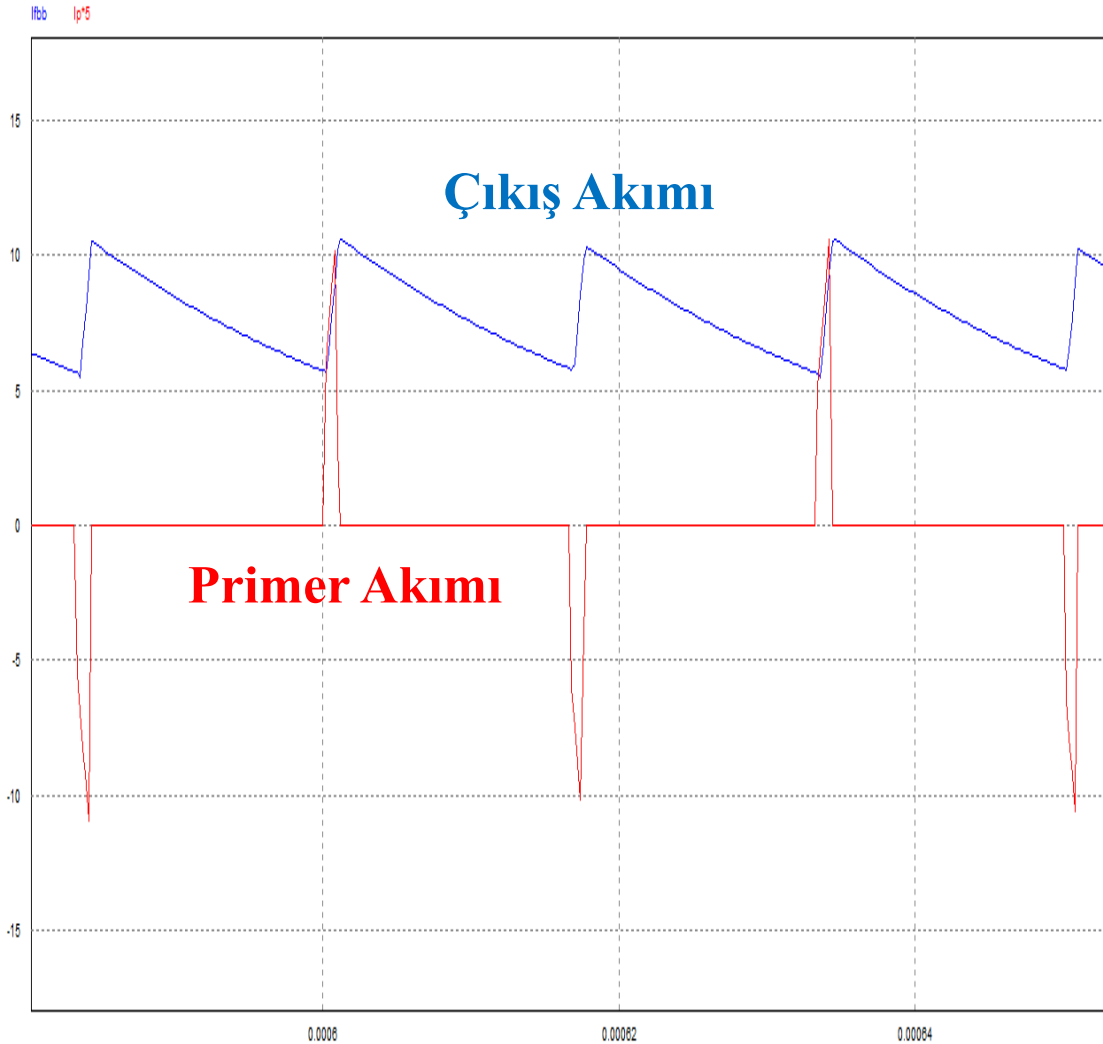


# AKIM ÖLÇME YÖNTEMLERİ



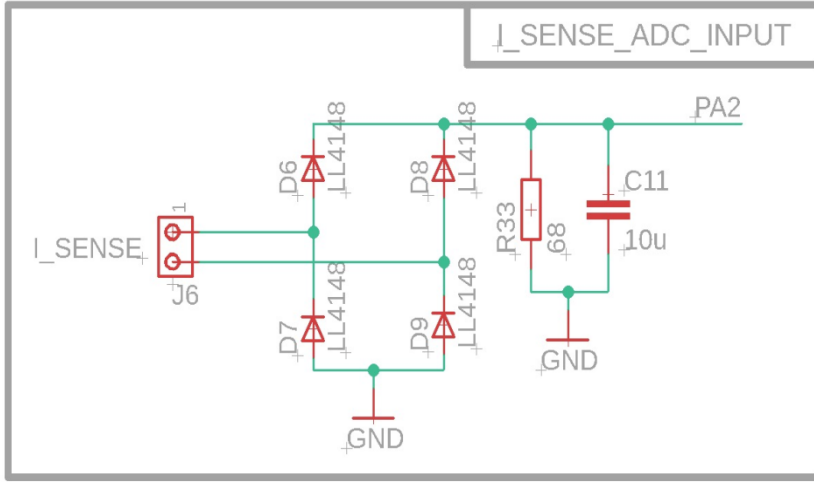
- Primerden akım ölçme yönteminde “Akım Trafosu”
- Seconder akım ölçme yönteminde “Hall Effect Sensör” kullanılmıştır.

# AKIM TRAFOSU ile PRIMER'DEN ÖLÇÜM YÖNTEMİ

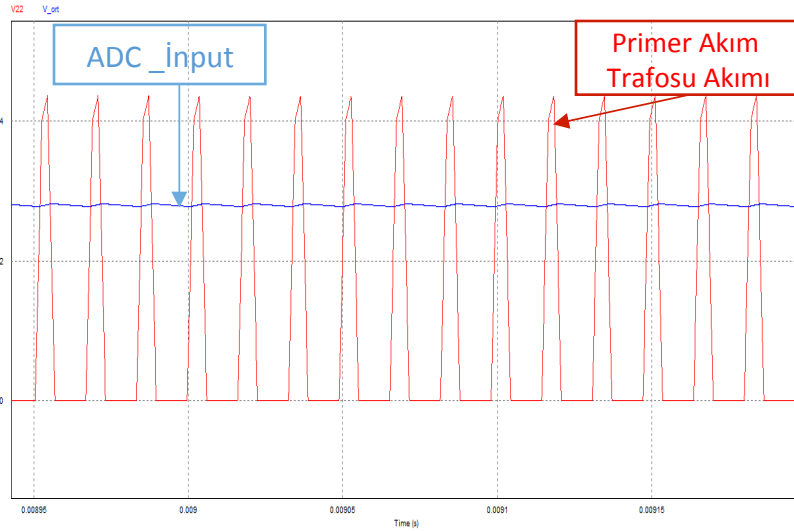


- Mosfet iletimde iken Primer akımının tepe değeri ile çıkış akımı arasında doğrusal bir ilişki vardır.
- Bir tepe değeri algılayıcı ile bu bilgi alınabilir.
- Ancak görev oranının çok küçük olduğu durumlarda tepe değeri yakalamak zorlaşır.

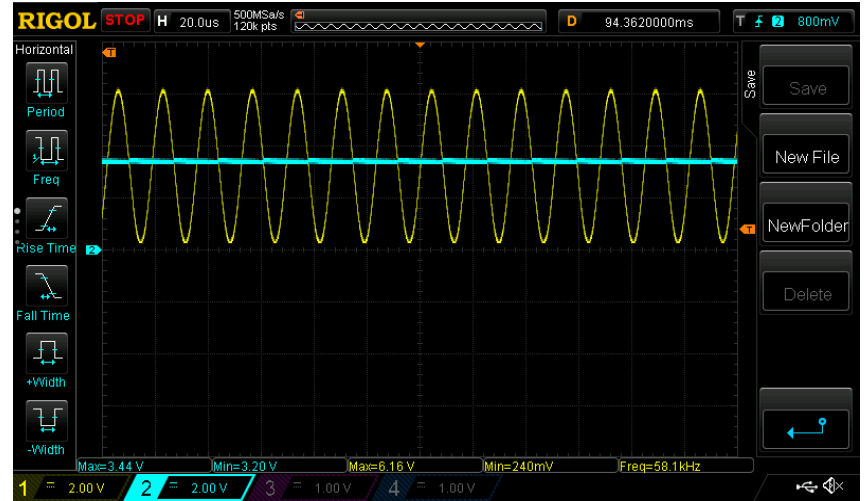
# PRIMER AKIM TEPE ÖLÇME YÖNTEMİ



- İlk tasarlanan devre.
- Tepe değeri doğru olarak elde edilemiyor.
- Dolayısıyla ölçüm hatası yüksek.



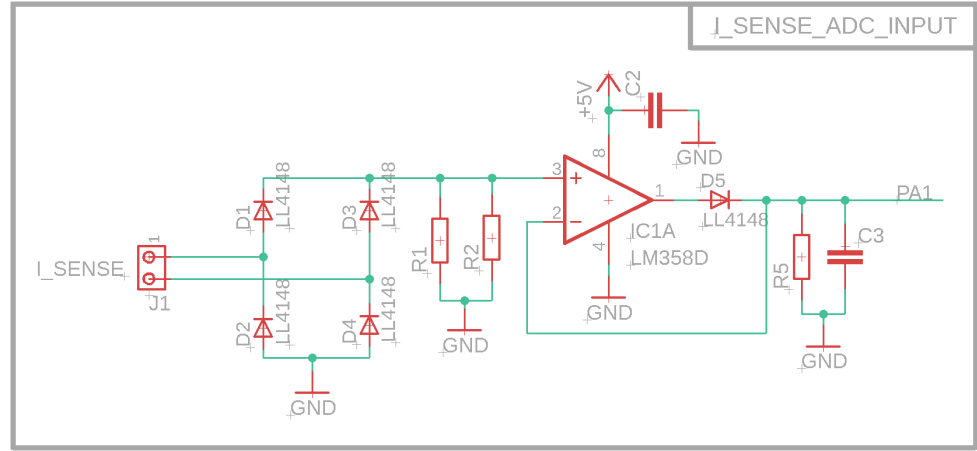
Simulasyon



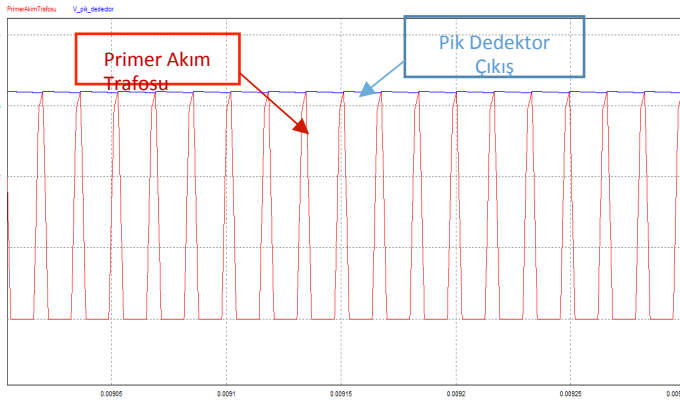
Deney

# OPAMP ile Tepe Değer Bulucu Devre

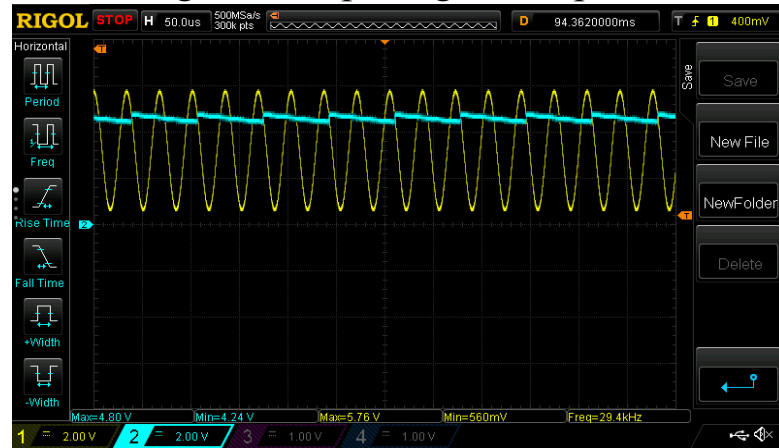
- Opamp kullanarak tepe değer izleyici devrenin hata payı azaltılabilir.
- Ancak slew rate değeri yüksek opamp kullanılması gereklidir.
- Üstelik bu yöntemin dinamik cevabı yavaş olmaktadır.



Kullandığımız Opamp'ın Slew Rate değeri düşük olduğundan tepe değeri takip edilemedi.

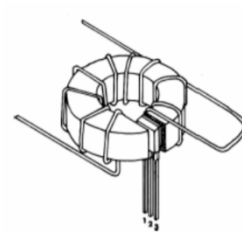
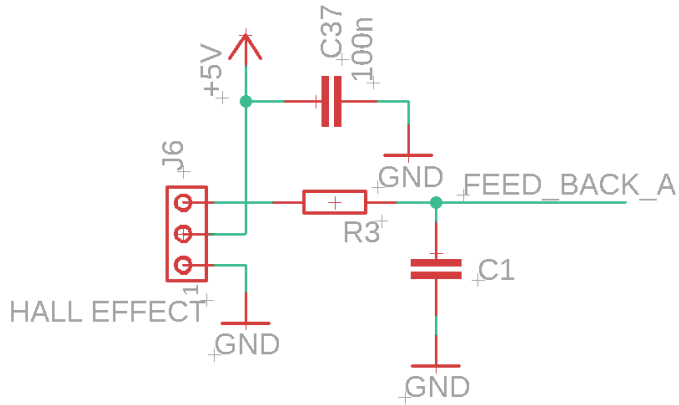
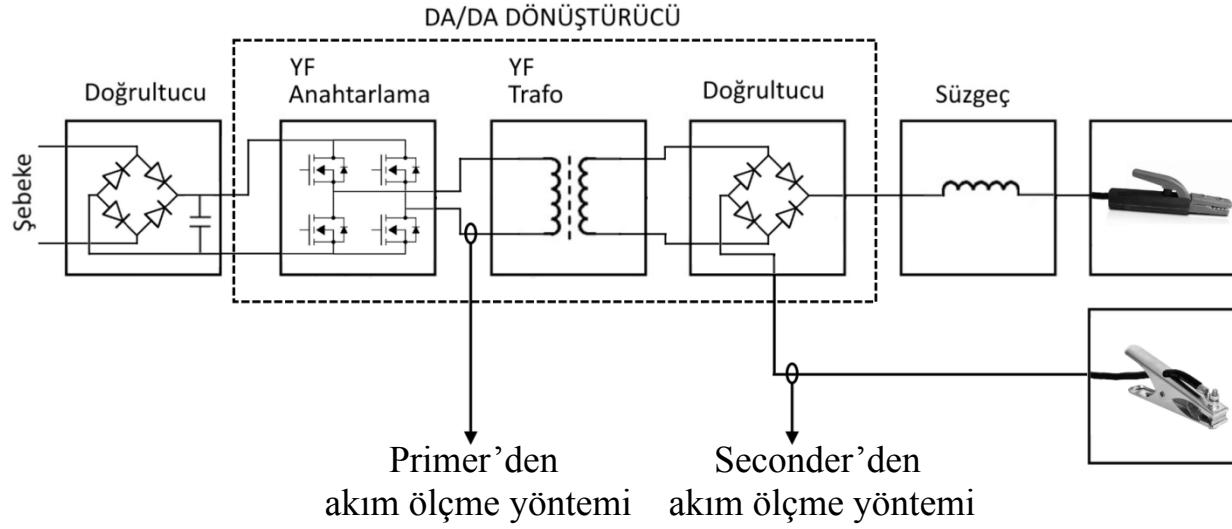


Simulasyon



Deney

# ÇIKIŞ AKIMINI DOĞRUDAN HALL EFFECT SENSÖR ile ÖLÇMEK

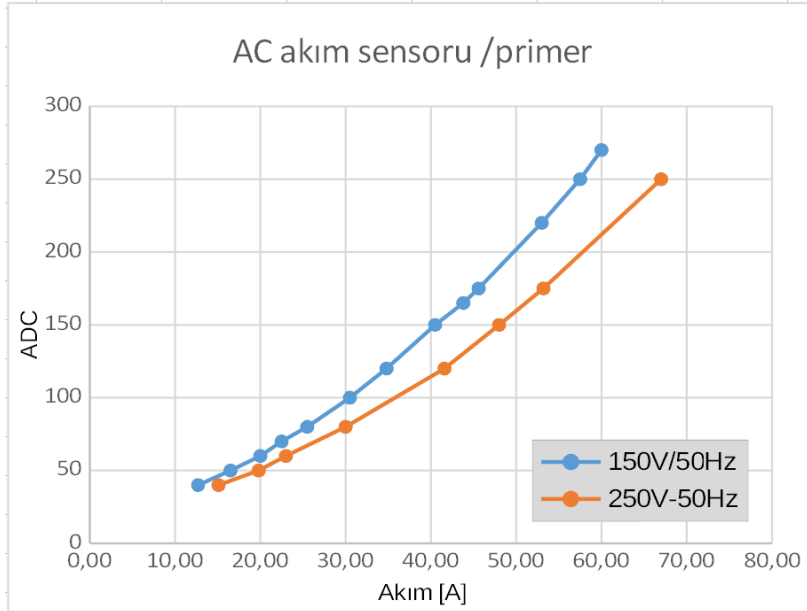


C503  
Linear Hall  
Effect  
Sensör

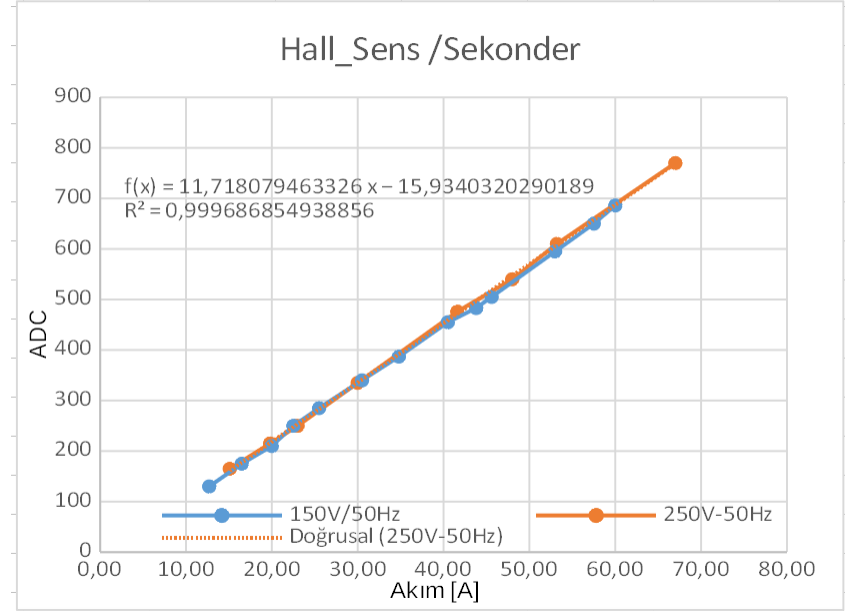


# AKIM ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

➤ Primer'den akım trafosu ile ölçüldüğünde;



➤ Seconder'den Hall Effect Sensör ile ölçüldüğünde;

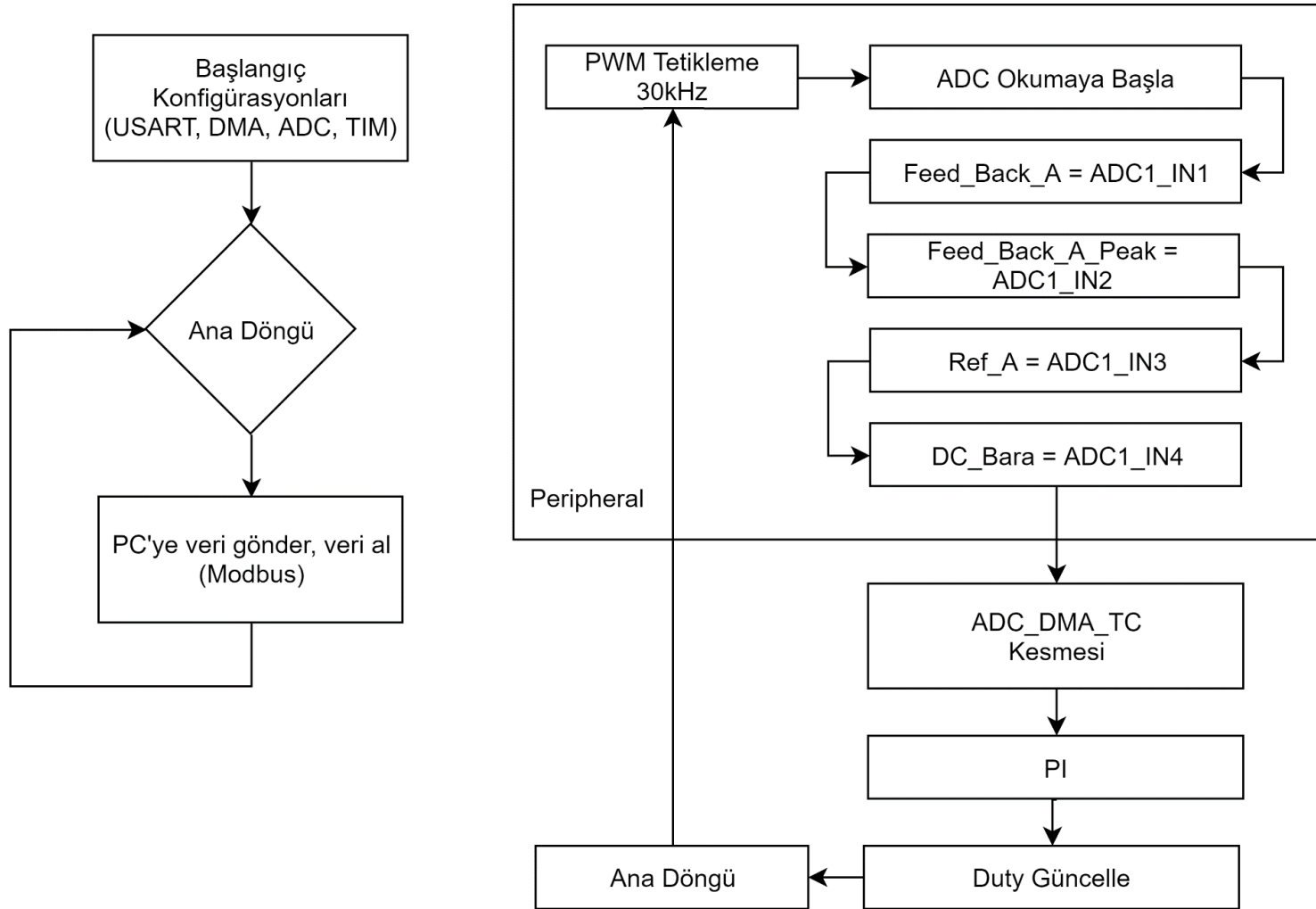


- Sırayla 150V/50Hz ve 250V/50Hz şebeke girişi verilerek, çeşitli akım değerlerinde ölçümler alınmıştır.
- Akım trafosu ile alınan ölçümlerin şebeke giriş geriliminden ve akım değerinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Ölçümler doğrusal değildir.
- Hall Effect sensör ile alınan ölçümler doğrusal sonuç vermektedir.
- Bu yüzden PI'da Feed Back girişi olarak Hall Effect sensör ölçümleri kullanılmıştır.

# STM32F407VG İLE KONTROL YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ



# PROGRAMIN AKIŞ DİYAGRAMI



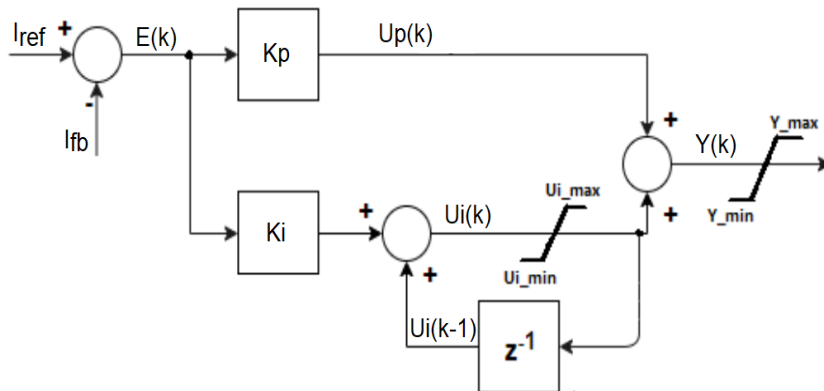


# PI denetleyicinin ayırık olarak gerçekleştirilmesi

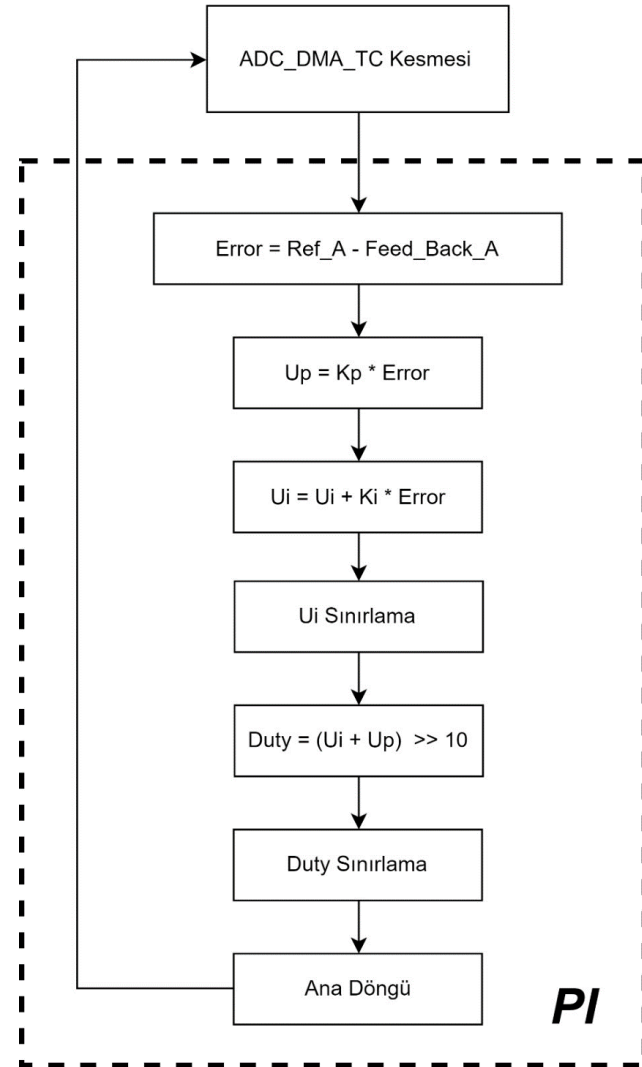
- Backward Euler yöntemini kullanarak s-düzleminde ayırık zaman düzlemine geçilebilir.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \xrightarrow{s = \frac{z-1}{zT_s}} PI(z) = Ki \frac{1 + s \frac{K_p}{K_i}}{\frac{z-1}{z.T_s}} = K_p + K_i T_s \frac{z}{z-1}$$

- Hata  $E(k) = I_{ref}(k) - I_{fb}(k)$
- Oransal kısım  $U_p(k) = K_p E(k)$
- İntegral kısım  $U_i(k) = K_i E(k) + U_i(k-1)$
- PI çıkış  $Y(k) = U_p(k) + U_i(k)$

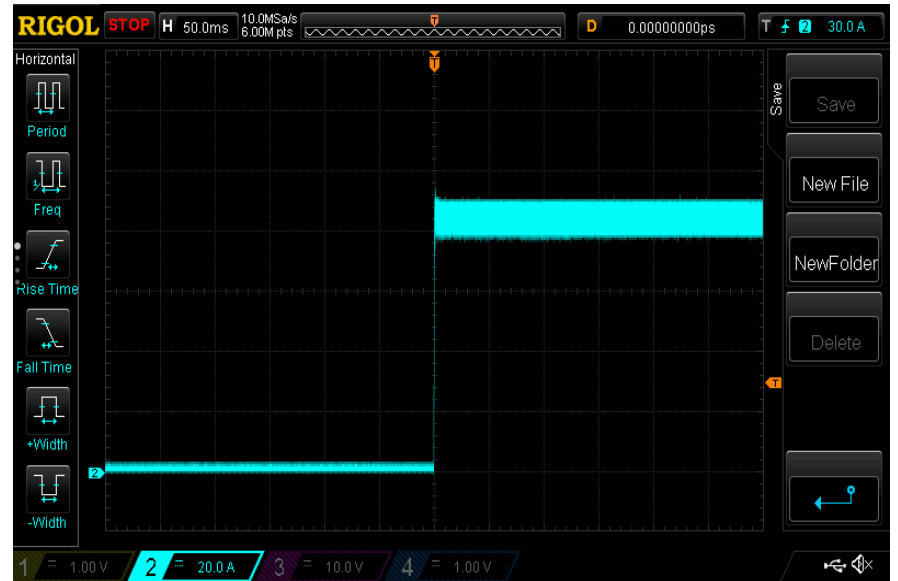
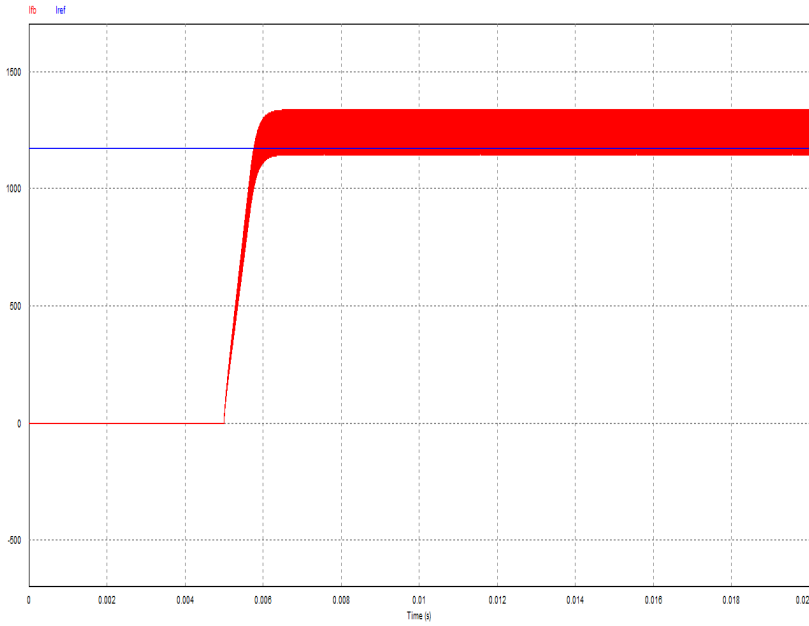


İntegral için uygun bir anti-windup bloğu eklenmelidir!



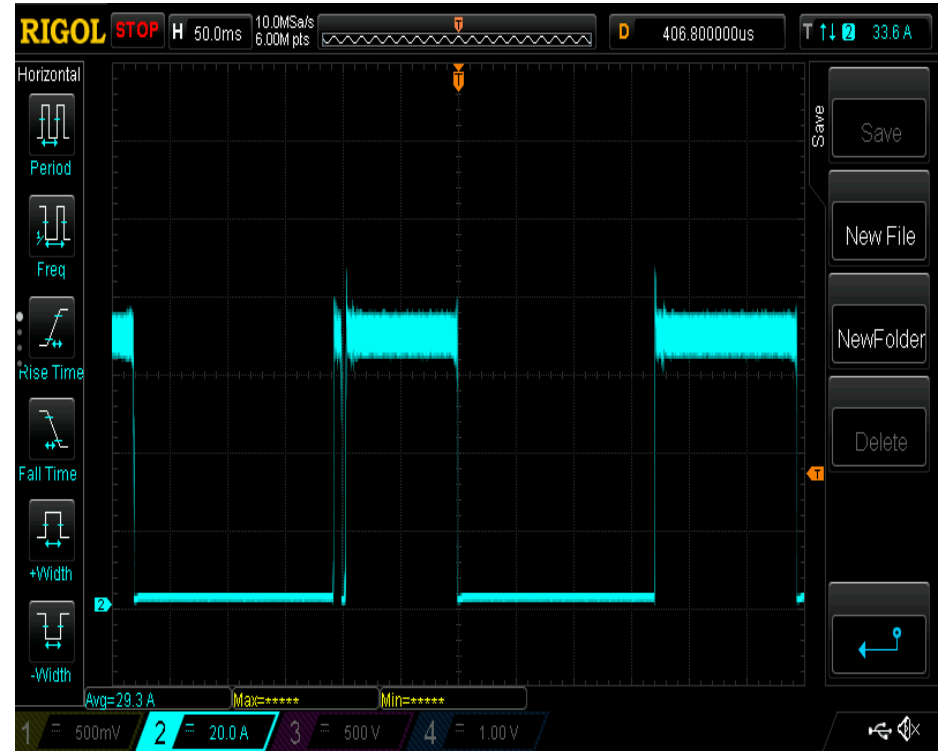
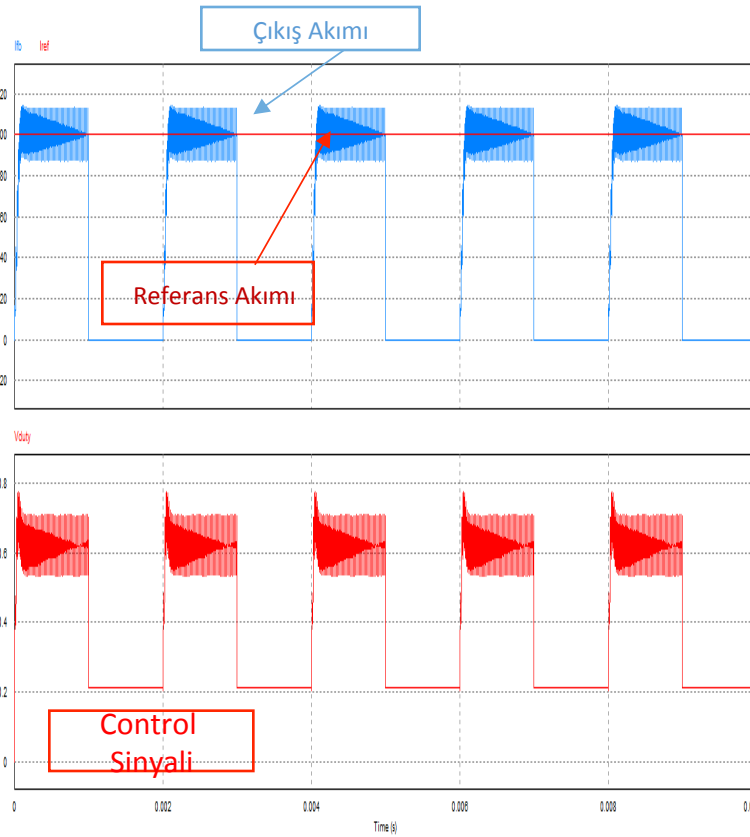
# ÇIKIŞ AKIMI BASAMAK CEVABI

## ➤ 100 Amper Yük Akımı



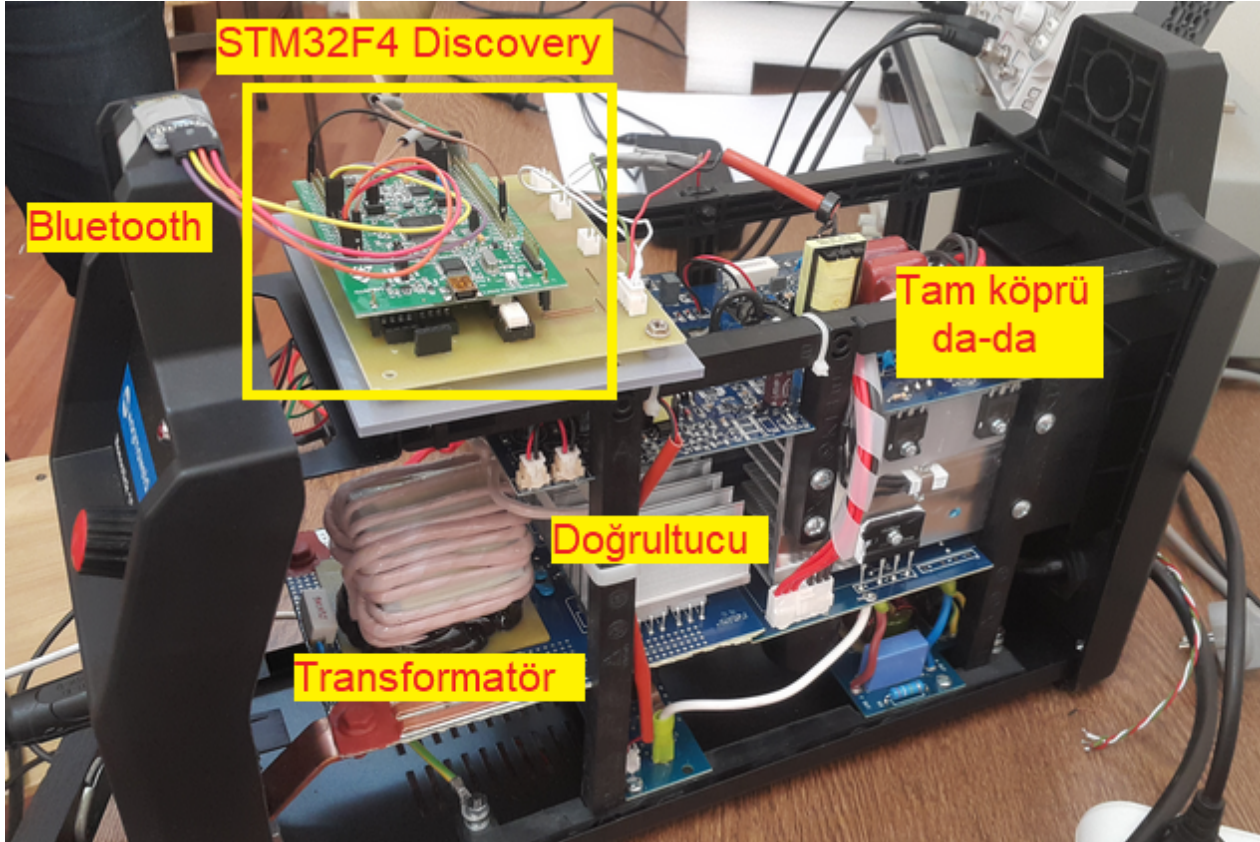
# Çıkış akımı açık-kısa devre dinamik cevabı

➤ 60 Amper Çıkış akımı için darbeli yük çalışması



# Kaynak makinesi genel görünüm

---



# SONUÇLAR

---

- 6 kVA gücünde endüstriyel bir kaynak makinasının akım kontrolü sayılas PI denetleyici ile gerçekleştirilmiştir.
- Çıkış akımında oturma süresi  $\sim 4$  ms olarak elde edilmiştir. Böylece  $\sim 250$  Hz'e kadar akım modülasyonu yapılabilir.
- Kontrol yöntemi parametrik olduğundan farklı kaynak profilleri ve kaynak akım değerleri bilgisayar ile uzaktan kontrol edilebilir. Böylece otomasyona uyumlu olarak çalışabilir.



DİNLEDİĞİNİZ İÇİN  
TEŞEKÜRLER...