

IMMD Motor Test Sonuçları

IMMD motorunun test prosedürü sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- İzolasyon kontrolleri
- Endüktans ölçümü
- Jeneratör modda yüksüz çalışma
- Jeneratör modda yüklü çalışma
- Motor modda hazır sürücüyle yüksüz çalışma
- Motor modda hazır sürücüyle yüklü çalışma
- Motor modda kendi sürücüsüyle yüksüz çalışma
- Motor modda kendi sürücüsüyle yüklü çalışma

Bu aşamaların ilk üçü 15/04/19 itibariyle tamamlanmış olup jeneratör modda yüklü çalışma testleri devam etmektedir.

1. İzolasyon kontrolleri: İlk olarak motorun kasa-faz ve faz-faz arası izolasyon dirençleri multimetre ile ölçülmüştür. Direnç değerleri genel olarak $M\Omega$ mertebesinde olduğu için sarım izolasyonlarında herhangi bir sorun olmadığı sonucuna varılmıştır.

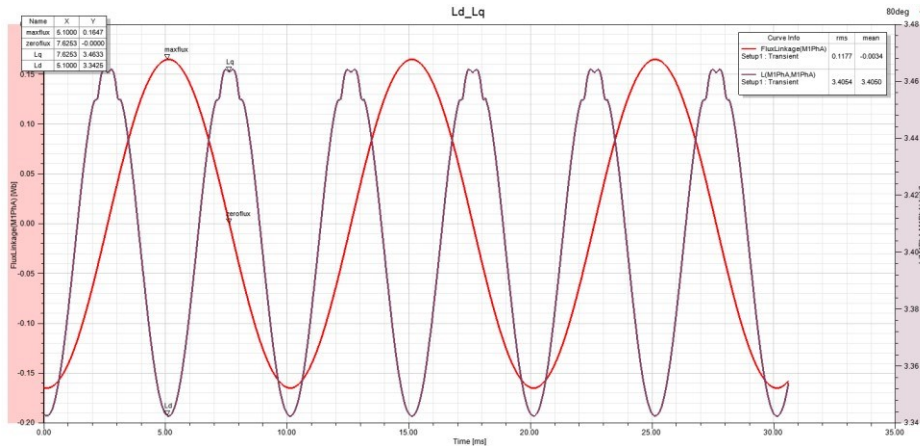
2. Endüktans ölçümleri:

- a. Eksen kayıklığı testi için:** Rotorun eksenindeki olası bir eksen kayıklığını tespit etmek için endüktans ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu testte rastgele bir sargı seçilip rotor yavaşça döndürülerek her mıknatıs aynı konuma gelince endüktans ölçülmüştür. Bütün değerler 3.51-3.52 mH civarında elde edildiği, rotor döndükçe endüktansta herhangi bir değişim gözlenmediği için rotorda herhangi bir eksen kayıklığı olmadığı sonucuna varılmıştır.

b. Motor parametrelerini elde etmek için: Her sarımın endüktansının maksimum ve minimum olduğu değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Sarım dirençleri ise 320 mΩ civarındadır.

		Max (mH)	Min (mH)		Max (mH)	Min (mH)
Module 1	Phase A	3.72		Module 3	3.2 Phase A	3.55
	Phase B	3.68			3.18 Phase B	3.67
	Phase C	3.56	3.12		3.68 Phase C	3.07
Module 2	Phase A	3.51		Module 4	3.05 Phase A	3.58
	Phase B	3.43			2.94 Phase B	3.64
	Phase C	3.62	3.07		3.62 Phase C	3.12

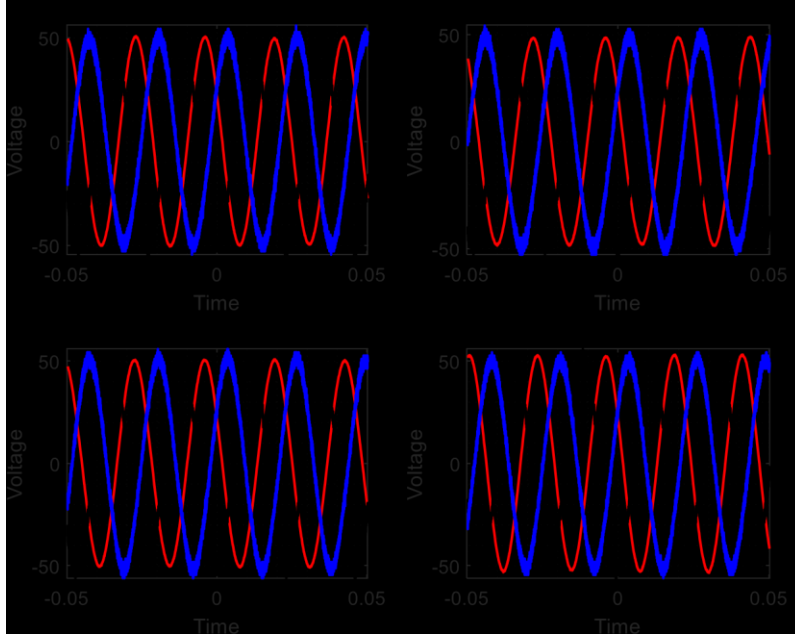
Bu değerler sarım ve işçilikle doğrudan alakalı olduğu için değişiklik gösterebilir, ancak D ve Q endüktansları arasındaki fark simülasyon sonuçlarına göre yüksek çıkmıştır. Aşağıdaki şekilde rotorun mıknatıs yuvalarının yanları yükseltilmiş ve en son üretilen haline göre yapılan simülasyon sonucundaki endüktans değerleri mevcuttur. Şekilde görüleceği gibi simülasyon sonuçlarına göre aradaki fark 0.1 mH civarındayken üretilen motorda 0.5 mH civarındadır.



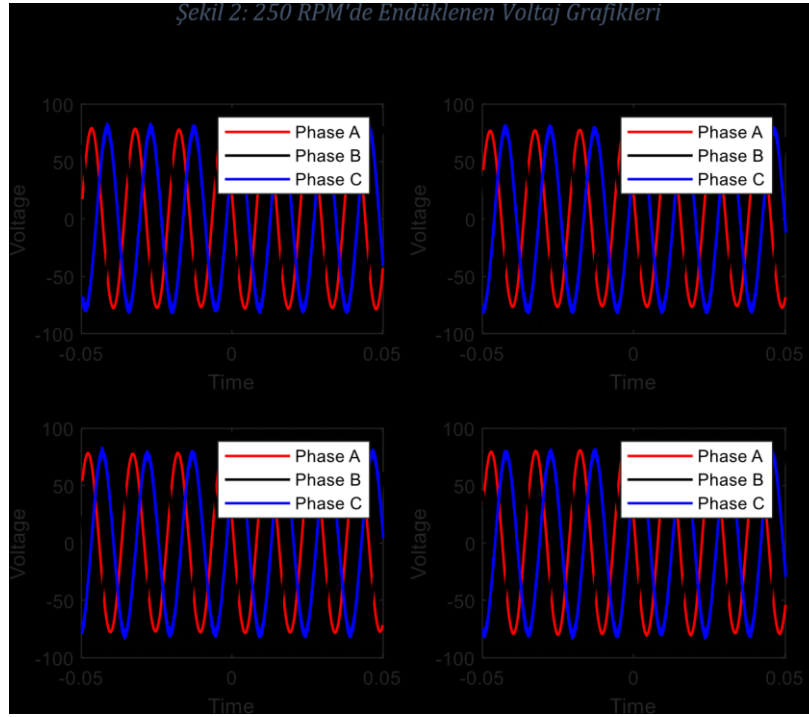
Şekil 1: Simülasyona Göre Motor Faz Endüktansı

3. Jeneratör Modda Yüksüz Çalışma:

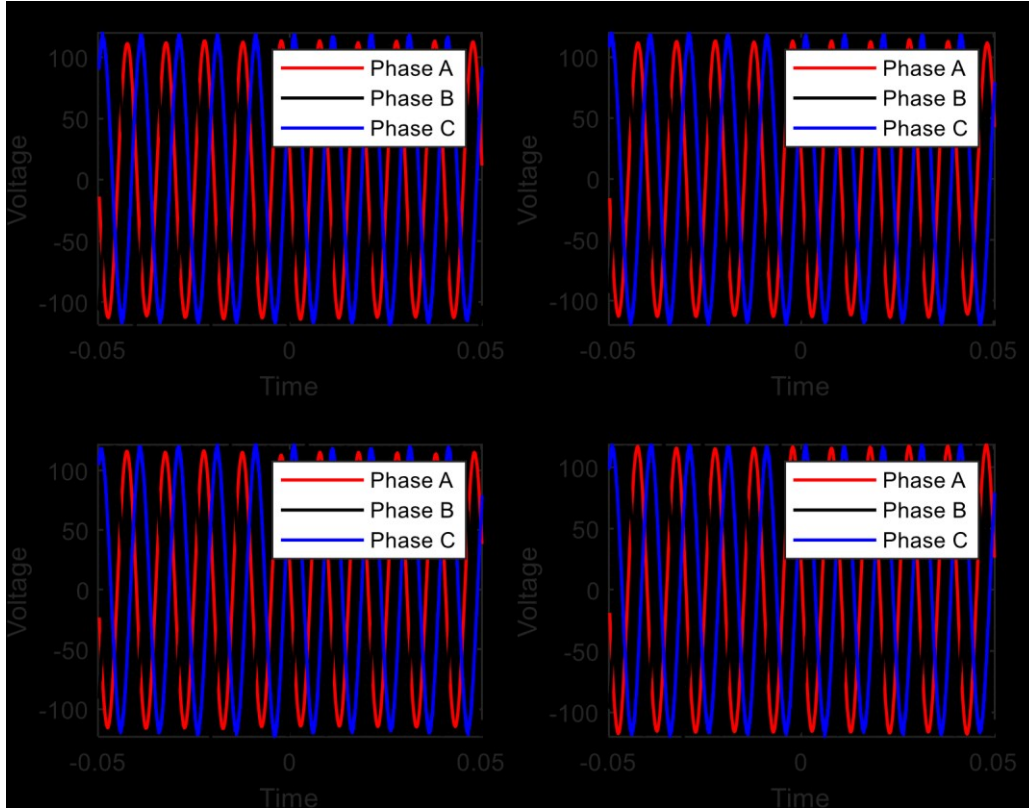
Motorun farklı hızlarına göre back EMF grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2: 250 RPM'de Endüklenen Voltaj Grafikleri



Şekil 3: 400 RPM'de Endüklenen Voltaj Grafikleri



Şekil 4: 600 RPM'de Endüklenen Voltaj Grafikleri

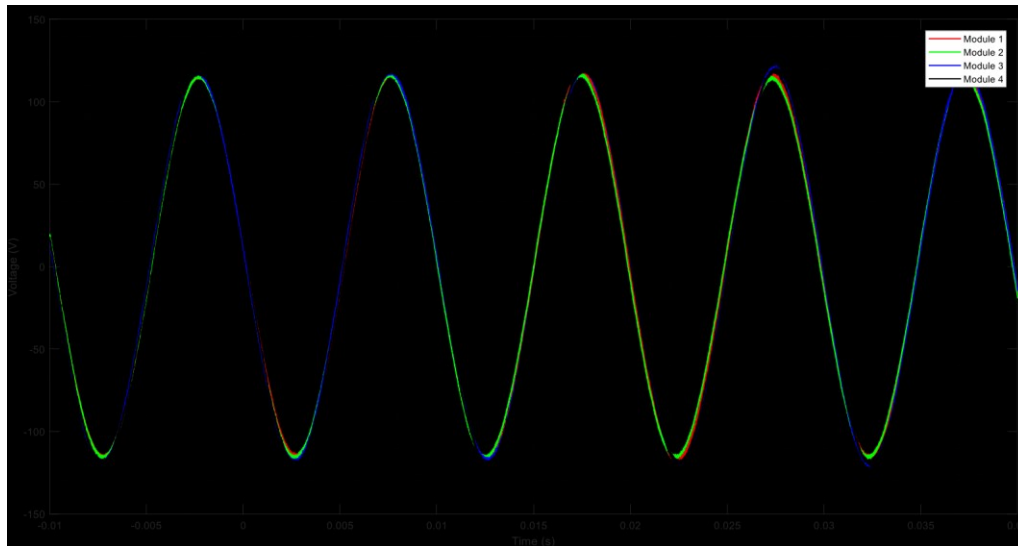
Ön değerlendirmeler:

- Motor 600 RPM'de dönerken hesaplamalarla uygun olacak şekilde faz başına 80 Vrms voltaj endüklenmektedir.
- Voltajın frekansı ve büyüklüğü beklendiği bir şekilde motor hızına bağlı lineer olarak değişmektedir.
- Dalgalar genel olarak düzgün birer sinüs gibi görünmekte, baskın bir harmonik komponentinin etkisi görünmemektedir.
- Fazlar arasında olması gerektiği gibi 120° elektriksel açı mevcuttur.

Her fazın 600 RPM'de RMS endüklenen voltajları aşağıdaki tabloda verilmiştir:

		Back EMF (Vrms)			Back EMF (Vrms)
Module 1	Phase A	79.3	Module 3	Phase A	81.1
	Phase B	79.3		Phase B	81.6
	Phase C	79.8		Phase C	81.8
Module 2	Phase A	79.5	Module 4	Phase A	81.9
	Phase B	79.0		Phase B	80.0
	Phase C	80.6		Phase C	80.1

Bu ölçüm esnasında her modüldeki problemleri söküp diğer modüle takarken motoru durdurup yeniden başlatmak gerektiği için, yeniden başlatıldığı zaman tam olarak aynı hızı veremeyebileceği için modül 3-4 ile 1-2 arasındaki farkın ölçüm hatasından kaynaklanıp kaynaklanmadığı konusunda bir belirsizlik mevcut. Bu belirsizliği önlemek ve modüllerin seri bağlanabilmesini ölçmek için her modülün aynı fazından endüklenen voltaj bilgisi alındı. Bu grafikler Şekil 5'te mevcuttur.

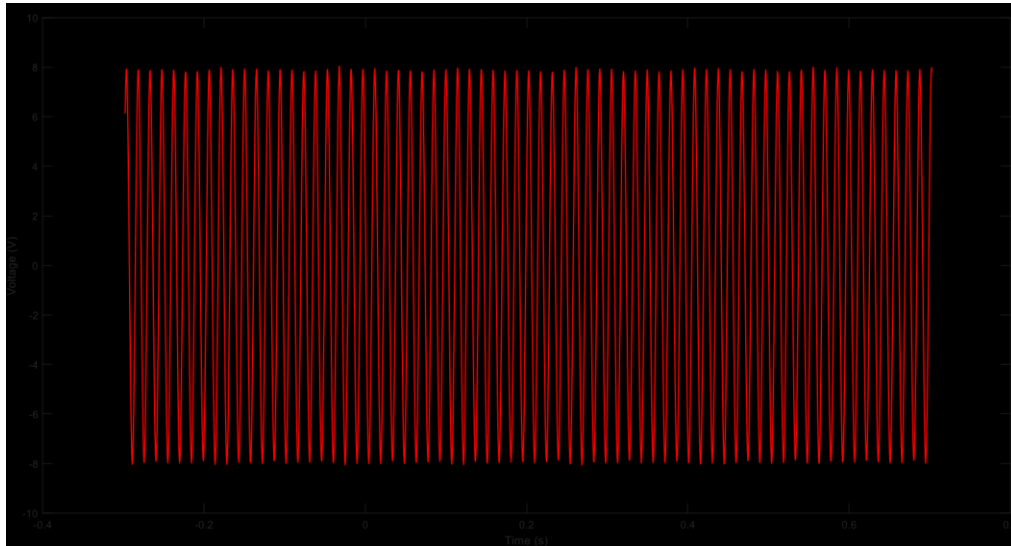


Şekil 5: Her Modüldeki A Fazında 600 RPM'de Endüklenen Voltaj

Modül 2'nin voltaj eğrisinde frekansta bir dalgalanma görünse de dört modüldeki voltajların arasında faz farkı yoktur. Bu ölçüme göre Modül 1'den 4'e endüklenen voltajların RMS değerleri sırasıyla 81.2, 80.4, 82.5 ve 83.1'dir.

Frekans Analizleri:

Endüklenen voltajların harmonik komponentlerini görmek amacıyla voltaj datası osiloskoptan MATLAB ortamına aktarılmış ve FFT analizi yapılmıştır. En başta, analizi yaparken sinüs cycle sayısının az olması fundamental frekanstaki büyüklüğün bant aralığının yüksek olmasına sebep olmuştur. Bu nedenle fazla cycle sayısına sahip bir voltaj datası alınıp Hanning window kullanılarak FFT analizi yapılmıştır. Spektrumu çıkarılan voltaj dalgası ve analiz sonucu Şekil 6 ve 7'de mevcuttur.



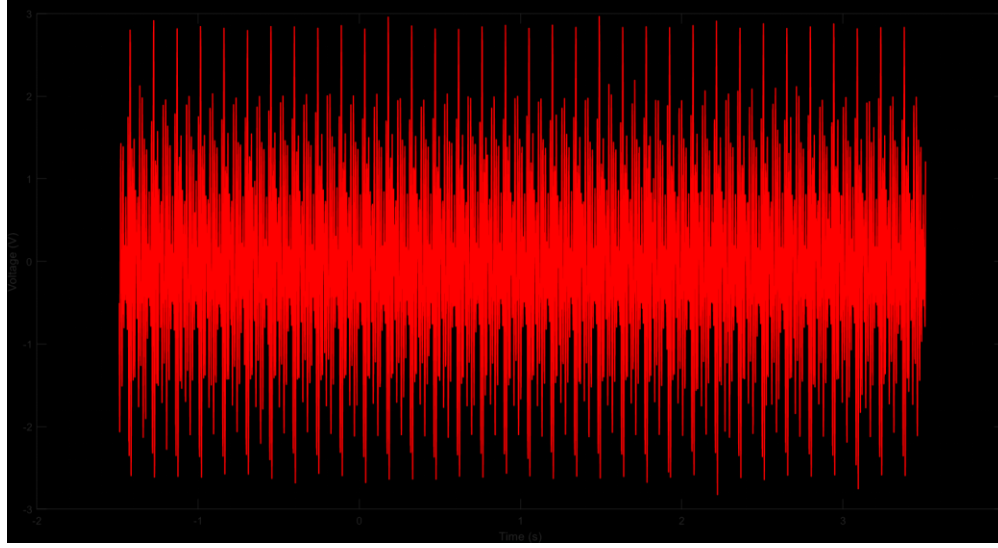
Şekil 6: Harmonik Analizi İçin Voltaj Grafiği



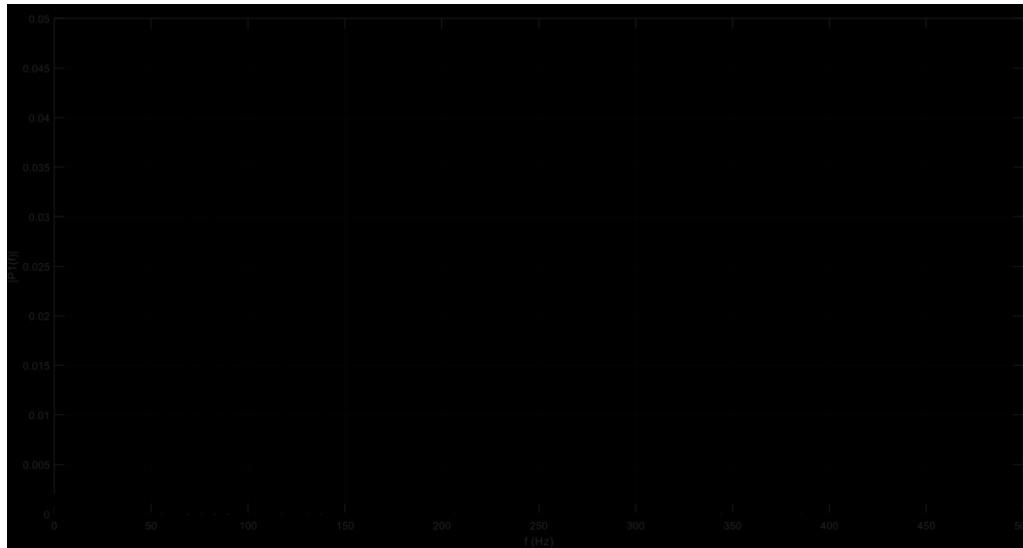
Şekil 7: Şekil 6'daki Grafiğin Harmonik Analizi

Bu voltaj eğrisi motor 400 RPM'de çalışırken alındığı için 67-68 Hz'de fundamental komponenti görmek bekleniyordu. Ancak diğer komponentler harmonik spektrumda ihmal edilebilecek düzeyde.

Aynı esnada diğer modüllerden iki tanesi birbirine zıt yönde seri bağlı haldeyken endüklenen voltaj grafiği kaydedildi. Bu grafik Şekil 8'de mevcut. Fundamental dışında harmonik komponenti olmayan 180° faz farklı iki sinüsün toplamının büyüklüklerine göre 0 veya fundamental frekansta başka bir sinüs olması beklenirken, Şekil 8'deki grafiğin harmonik komponentleri ise Şekil 9'daki gibi elde edildi.



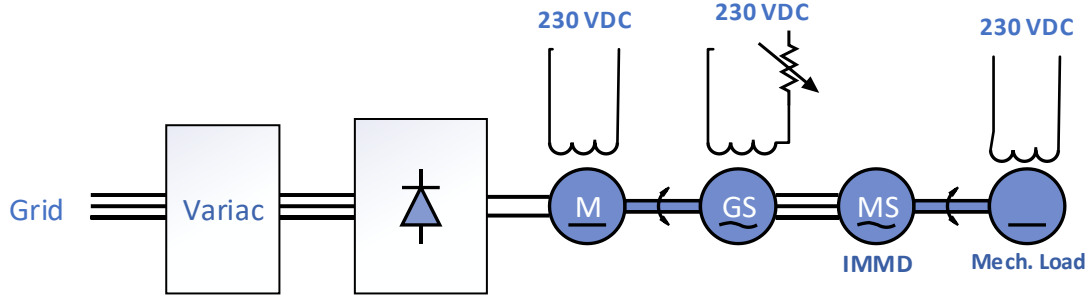
Şekil 8: Seri ve Ters Bağlı İki Faz Voltajı



Şekil 9: Şekil 8'deki Voltajın Harmonik Analizi

4. Motor Modda Çalıştırma

Prosedür: Motoru motor modda çalıştırmak için kurulan setup aşağıdaki gibidir.



Şekil 10: Motor Modu Testleri İçin Kurulan Deney Düzeneği

Bağlantı detayları için EE361 lab manuelindeki 5. deneyden faydalanılabilir.

Motorun ilk çalışma anında rotor uygun pozisyonda durmadığı için şaftta titreme gözlenecektir. Motoru çalıştırabilmek için en başta 20 Hz civarı frekansta voltaj uygularken (senkron jeneratör çıkışı, IMMD girişi) şaftı saat yönünün tersinde elle çevirerek uygun açığa gelmesini sağlamak gerekmektedir.

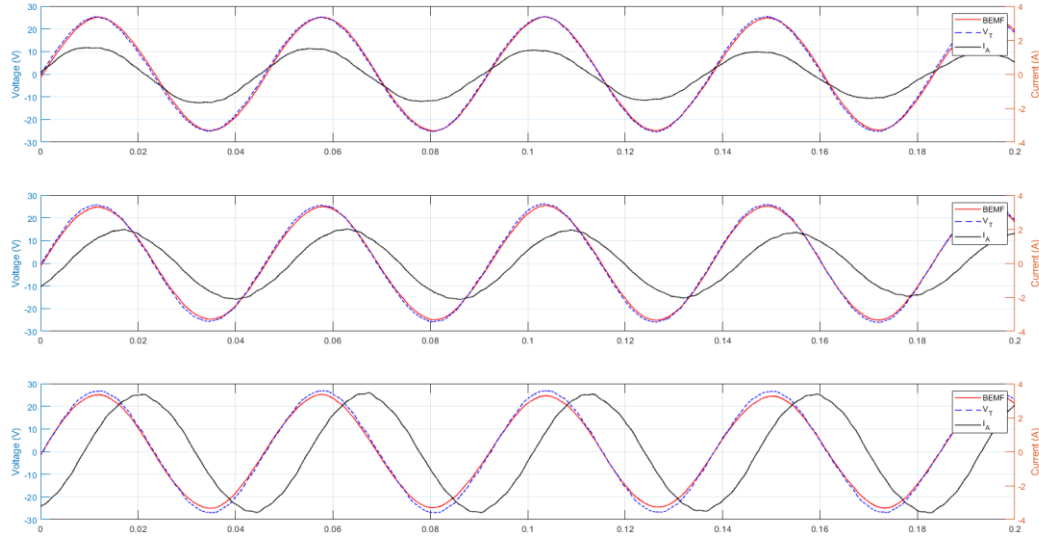
Input Voltage – Line Current – Load Angle – PF Değişimlerinin Gözlenmesi:

Jeneratör modda çalıştırma esnasında 3 farklı hızda BEMF büyüklükleri (faz-nötr) kaydedilmiştir. Modüller arası farklılıklar göz ardı edilerek (± 1 V) elektriksel frekans ve ortalama BEMF değerleri aşağıdaki gibi kaydedilmiştir.

Frekans (Hz)	BEMF (V,rms)
42	36,4
69	62,8
100	80

Motor modunda yapılacak deneylerde gereken BEMF ve frekans değerleri, bu değerler interpolate edilerek elde edilebilir.

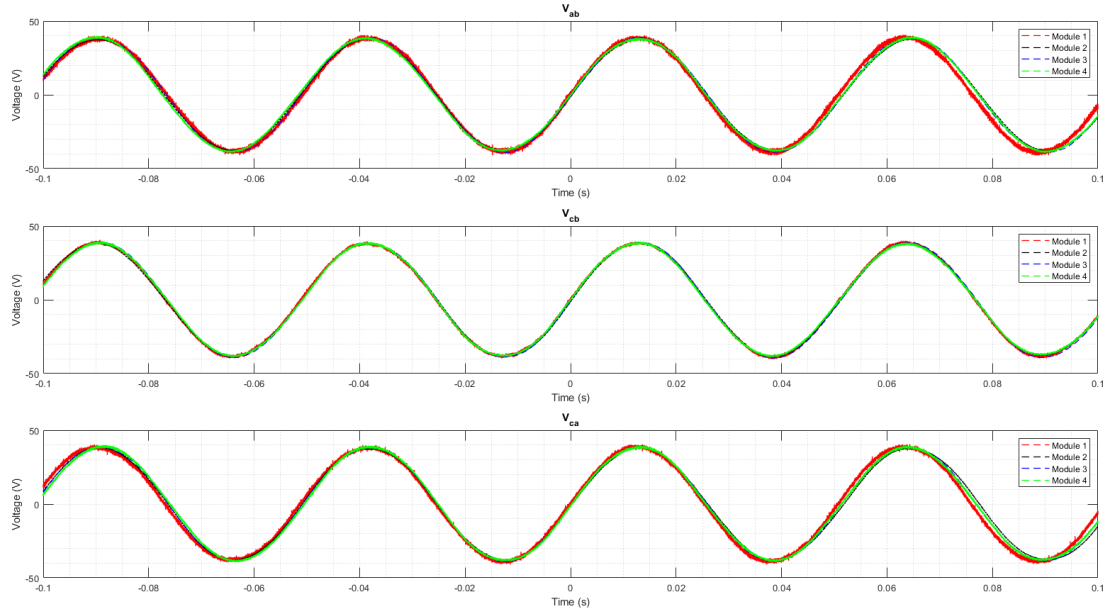
Bu aşamada tek modül enerjilendirilmiştir. Enerjilendirilmeyen diğer modüllerden birinin aynı fazından BEMF ölçümü, enerjilendirilen modülün aynı fazından input voltage ölçümü ve yine aynı fazdan akım ölçümü alınmıştır. Farklı input voltage değerlerinde bu parametreler kaydedilmiştir ve aşağıdaki gibidir.



	E_f (V,rms)	I_a (A)	pf	Load Angle
$V_t = 17.56$ Vrms	17.41	1.03	0.985 lead	1.5 deg
$V_t = 18.12$ Vrms	17.44	1.38	0.730 lag	1.5 deg
$V_t = 18.68$ Vrms	17.39	2.45	0.374 lag	1.5 deg

Modül Voltajlarının Kıyaslanması:

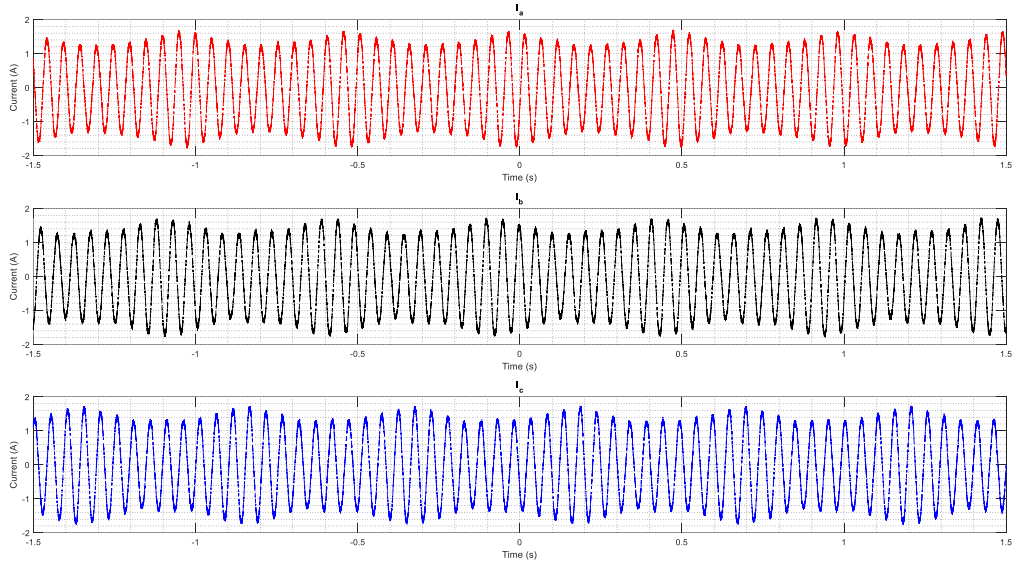
Her bir modül için V_{ba} , V_{cb} ve V_{ca} değerleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Burada modül 1 beslendiği için modül 1’e ait voltaj input voltajı, diğer modüllere ait voltajlar ise BEMF değerleridir. Modüller arasında herhangi bir faz veya magnitude dengesizliği yoktur.



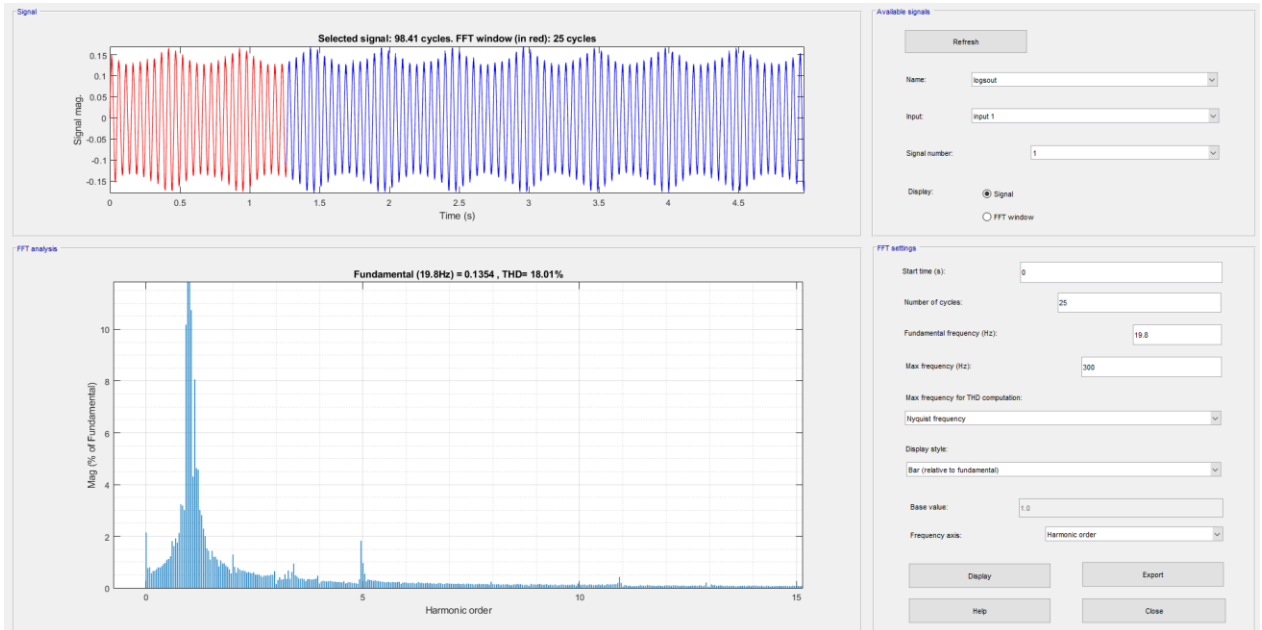
Şekil 11: Modüllerin L-L Voltaj Değerleri

Akım Harmoniklerinin İncelenmesi:

Motor 20 Hz ve 50 Hz frekanslarında çalışırken modül 1’in faz akımları kaydedilmiştir. 20 Hz’deki akım değerleri Şekil 12’de mevcuttur. Grafiklerde akım waveformunun üzerinde 1/10 oranında bir frekansta bir envelope gözlenmektedir. FFT analizi sonuçlarında bu envelope fundamental component’in yanında side harmonik olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu dalgalanmanın mekanik frekansta olması, yük olarak kullanılan motordan kaynaklanabilecek mekanik bir dengesizliğin buna yol açabileceğini göstermektedir. Kaydedilen akım değerlerinin FFT analiz sonuçları Şekil 13 ve 14’te mevcuttur. Side harmonikler dışında 5. harmonik değeri de kıyaslanabilir miktardadır ve motor hızı arttıkça azalmaktadır.



Şekil 12: Modül 1 Faz Akım Değerleri (20 Hz)



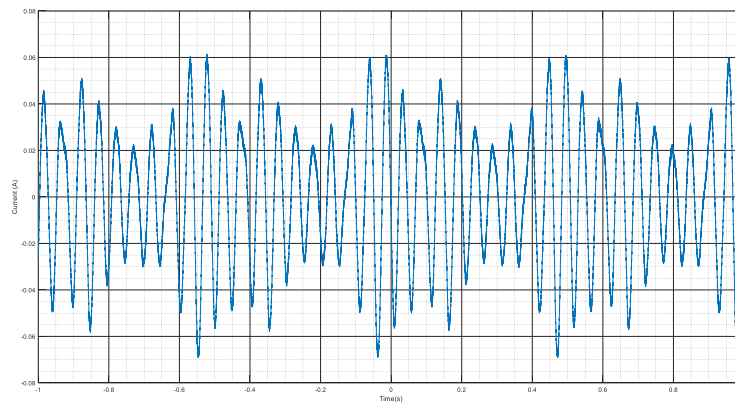
Şekil 13: 20 Hz'deki Akımın FFT Analiz Sonucu



Şekil 14: 50 Hz'deki Akımın FFT Analiz Sonucu

Modüllerin Paralel Bağlantı Altında İncelenmesi:

Motor 1. Modülden enerjilendirilirken 2, 3 ve 4. Modüller birbirleri arasında paralel bağlanarak bu esnada modüller arasındaki BEMF farklarından oluşan dolaşım akımları gözlemlenmiştir. Dolaşım akımları modüller ve fazlar arasında farklılık göstermekte ve 0.2 - 0.6 Arms arasında değişmektedir. Dolaşım akımlarının büyüklüğü **artan hız ile önemli ölçüde değişmemektedir**. Hız arttıkça inductanceların direnci baskın olup akımı sınırlamaktadır. Örnek bir akım grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 15: Modüller Arası Dolaşım Akımı

Dolaşım akımları sürekli olarak bobinler üzerinde kayıplara neden olup ısınma yaratacaktır. En yüksek 0.6 Arms dolaşım akımı, 320 mΩ dirençli 24 bobin üzerinde yaklaşık 3 W kayba sebep olacaktır.

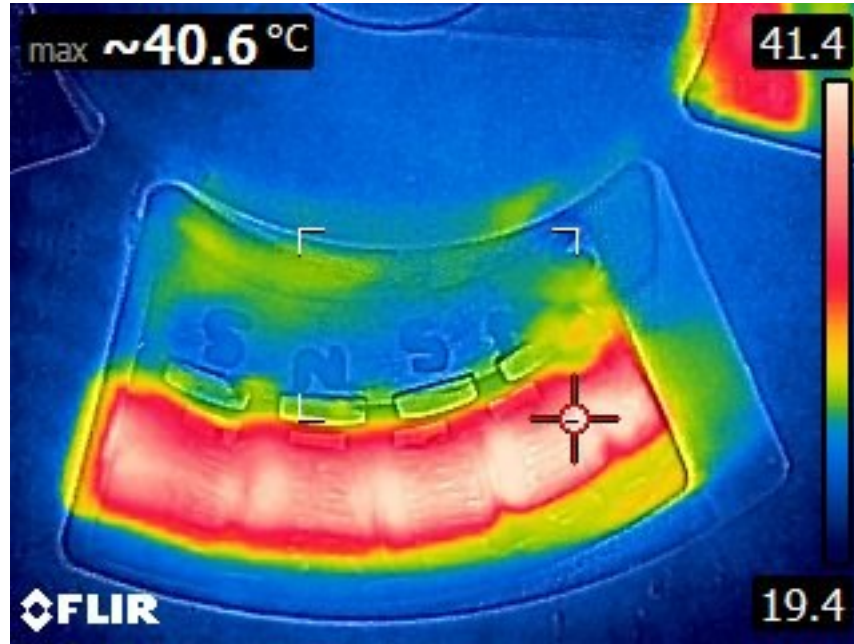
Motoru Yük Altında Çalıştırma ve Termal Testler

Motordaki bakır kayıplarının yarattığı ısınma miktarını ve fanların çalıştırılması durumunda sıcaklığın düşüşünü gözlemleyebilmek için bobinlere rated 8 A DC akım uygulanmıştır. Thermal input 276W'tır. Kaydedilen sıcaklıklar aşağıdaki tabloda mevcuttur.

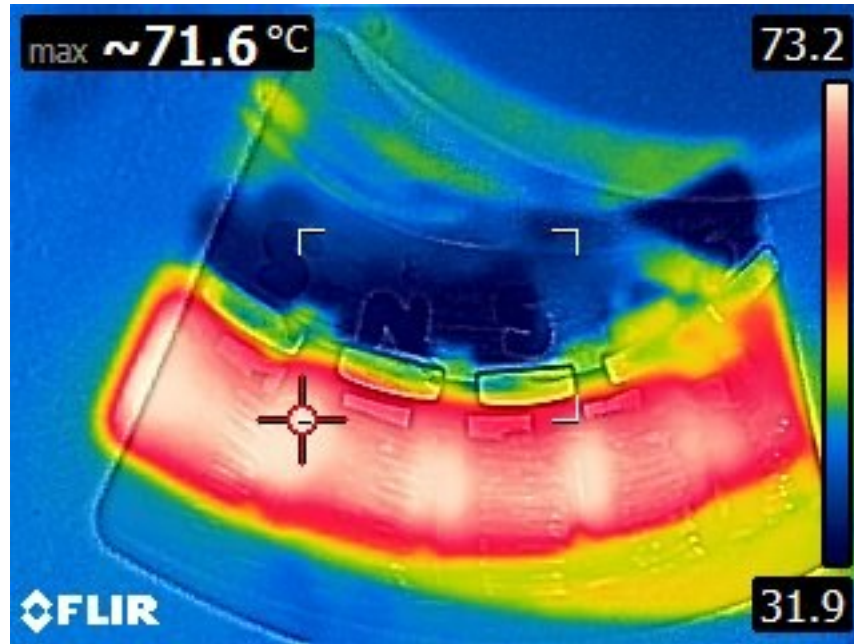
Time	Temperature	Min Steps
15:03:00	40.6	00:00:00
15:05:00	48.1	00:02:00
15:07:00	48.6	00:04:00
15:09:00	55.9	00:06:00
15:20:00	59.8	00:17:00
15:27:00	64	00:24:00
15:32:00	64.4	00:29:00
15:36:00	66.7	00:33:00
15:38:00	68.8	00:35:00
15:43:00	69	00:40:00
15:44:00	71.6	00:41:00
15:47:00	68.5	00:44:00
15:50:00	63.4	00:47:00
15:55:00	61.2	00:52:00
16:00:00	60.5	00:57:00
16:07:00	57.4	01:04:00
16:14:00	59.2	01:11:00
16:20:00	59.3	01:17:00

PT100 kullanılarak düzgün ölçüm alınamadığı için termal kamera kullanılmıştır. Burada end winding sıcaklıkları göz önünde bulundurulmuştur.

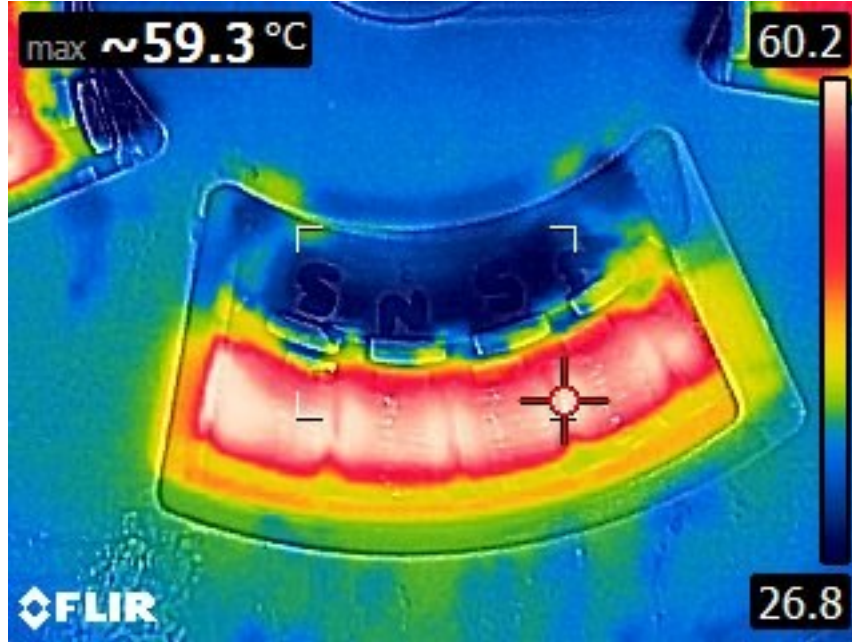
Ölçüm alınmaya başlandığında, maksimum sıcaklığa ulaşıldığında ve fanlar çalıştırıldıktan sonra steady state durumuna gelindiğindeki termal kamera görüntüleri aşağıda mevcuttur.



Şekil 16: Ölçüm Alınmaya Başlandığındaki Sıcaklık



Şekil 17: Maksimum Sıcaklık



Şekil 18: Fanlar Soğuttuktan Sonraki Sıcaklık

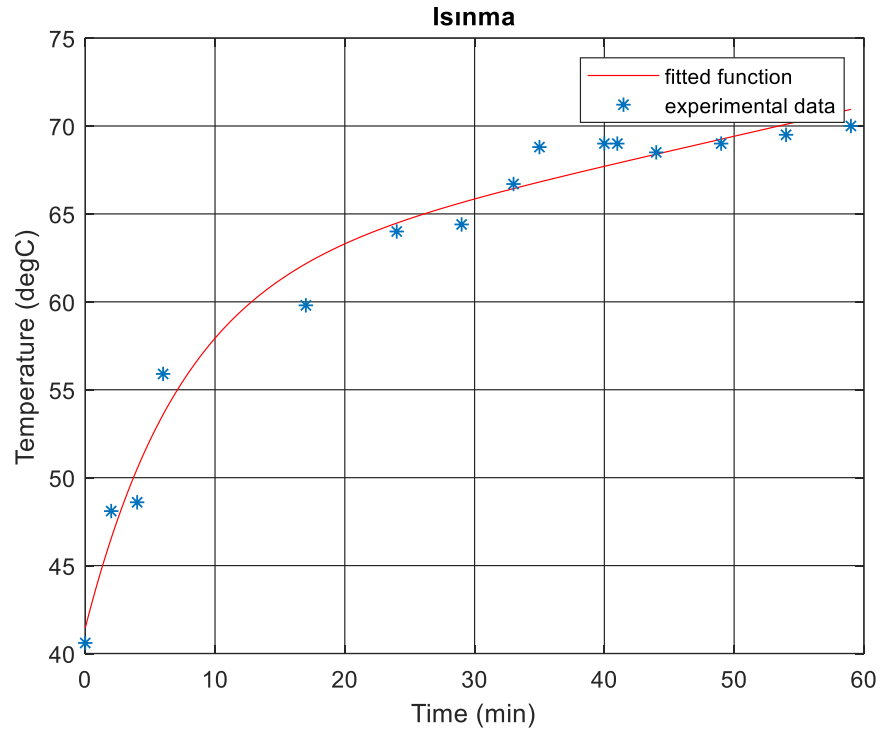
Maksimum sıcaklığa ulaşıp sıcaklık artmamaya başladıktan sonra fanlar çalıştırılmıştır. Fanlar 12V ile beslenmiştir ve toplamda 0.48 A akım çekmiştir. Yaklaşık 5W'lık mekanik yük altındadır.

Sıcaklık değerleri kaydedilip Matlab'daki "fit" fonksiyonuyla exponential fonksiyonlara fit edilmiştir. Sonuç olarak ısınma ve soğuma için elde edilen fonksiyonlar aşağıdaki gibidir:

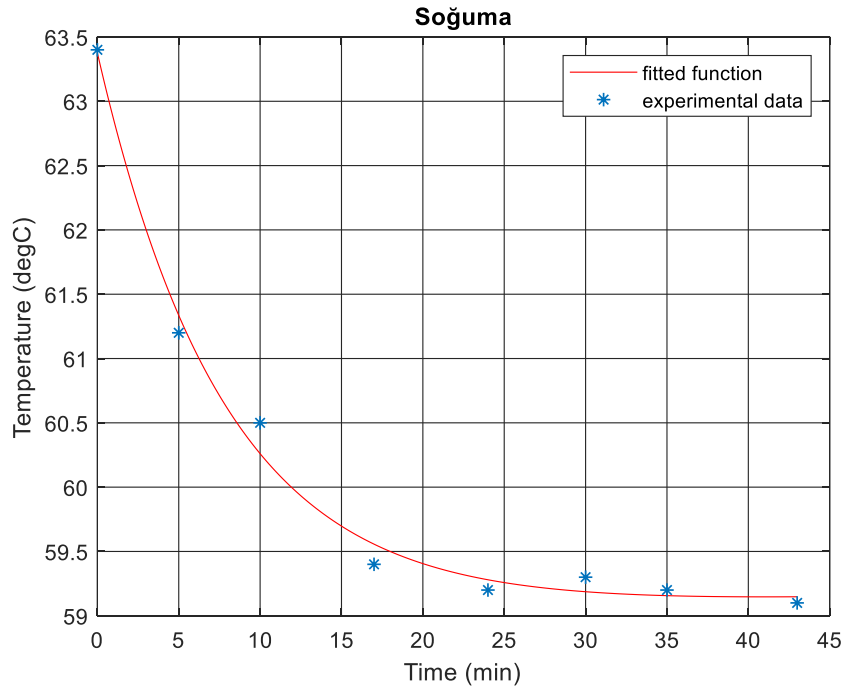
Isınma: $71-30 e^{-0.1362 t}$

Soğuma: $59-10 e^{-0.1269 t}$

Bu fonsiyonlar sonucunda thermal time constant (τ) değerleri sırasıyla 7.342 dk ve 7.880 dk olarak elde edilse de deneysel data incelenerek bu değerler 17 dk ve 6 dk olarak hesaplanmıştır. Matlab'da elde edilen fonskiyon grafikleri Şekil 19-20'de mevcuttur.



Şekil 19: Isınma Eğrisi



Şekil 20: Soğuma Eğrisi