

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE KOMŞU FAZ AKIMLARININ AKIM
TRANSFORMATÖRLERİNDE HATA DEĞERLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali YILDIRIM**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serhat ŞEKER

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE KOMŞU FAZ AKIMLARININ AKIM
TRANSFORMATÖRLERİNDE HATA DEĞERLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali YILDIRIM
(504061027)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)
Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İTÜ)**

OCAK 2011

Eşime,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serhat ŞEKER'e ve her türlü yardımını esirgemeyen Sayın Zeki AKÇALI'ya teşekkürü borç bilirim.

Tezin yazılması sürecinde her zaman yanımda yer alan, manevi desteğini esirgemeyen eşime ve bu günlere gelmemde hiçbir fedakârlıktan çekinmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2011

Ali YILDIRIM
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	v
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Kapsamı	2
2. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ	3
2.1 Genel Bilgi	3
2.1.1 Kullanım alanlarına göre akım transformatörü çeşitleri	4
2.2 Akım Transformatörlerinin Çalışma Prensibi.....	9
2.2.1 Akım transformatörleri eşdeğer devresi ve fazör diyagramları	9
2.3 Akım Transformatörlerinde ölçme hataları.....	11
2.3.1 Akım transformatörlerinde ölçme hatalarının hesaplanması	13
2.3.2 Hata oranlarının akım ile değişimi	14
2.3.3 Amper – Sarım’ın hata oranı üzerindeki etkisi	16
2.4 Düşük Güçlü Akım Transformatörleri (DGAT)	16
3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNDE DOYMA	19
3.1 Manyetik Doyma Etkisinin İncelenmesi.....	19
3.1.1 Doyma etkisi	24
3.1.2 Doyma faktörü ve doyma zamanı	25
3.1.3 Mıknatıslanma eğrisi.....	27
3.1.4 B-H eğrisine göre $V-I_m$ eğrisinin elde edilmesi:	28
4. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN YERLEŞİMİ	31
5. DENEY.....	37
5.1 Deney Yapıldığı Yer Ve Akım Transformatörlerinin Özellikleri.....	37
5.2 Deney Düzenegi	38
5.3 Deney Ve Ölçme Devreleri.....	41
5.3 Deneyin Yapılışı.....	43
5.4 Deney Sonuçları	43
6. DENEY SONUÇLARI.....	49
6.1 Aynı Düzlemdeki Akım Transformatörlerinde Hata Değerleri	49
6.2 1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
6.3 Farklı Düzlemdeki Akım Transformatörlerinde Hata Değerleri.....	53
6.4 2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	55
7. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	61

SEMBOLLER

A_j	: Kesit alan
B	: Manyetik akı
C_c	: Eşdeğer kablo kapasitesi
E_1	: Primerde indüklenen gerilim
E_2	: Sekonderde indüklenen gerilim
f	: Frekans
H	: Manyetik alan şiddeti
I_{cth}	: Sürekli termik akım
I_E	: Uyarma akımı
I_f	: Uyarma akımı reaktif bileşeni
I_{st}	: Toplam sekonder akımı
I_{th}	: Kısa devre akımı
I_μ	: Uyarma akımı aktif bileşeni
I_1	: Primer akımı
I_2	: Sekonder akımı
k	: Çarpan
K_n	: Transformatör çevirme oranı
L_j	: Manyetik devre uzunluğu
L_m	: Mıknatıslanma reaktansı
n	: Güvenlik faktörü
N_1	: Primer sarım sayısı
N_2	: Sekonder sarım sayısı
$P1, P2$	: Primer terminalleri
R_B	: Yük direnci
R_c	: Kablo direnci
R_{FE}	: Eşdeğer demir kayıpları direnci
R_s	: Sekonder direnci
R_{sh}	: Şönt direnç
$S1, S2$	: Sekonder terminalleri
V_B	: Akım transformatörü çıkış gerilimi
V_X	: Sekonder doyma gerilimi
Z_B	: Yük empedansı
Z_E	: Uyarma empedansı
X_B	: Yük reaktansı
X_L	: Kaçak reaktans
ϕ_{FH}	: Faz hatası açısı
ϕ_p	: Primer faz açısı
ϕ_s	: Sekonder faz açısı
ε	: Hata oranı
ε_b	: Bileşik hata
Ψ_s	: Doyma akısı
Ψ_r	: Kalıcı manyetik akı

μ_r	: Manyetik geçirgenlik katsayısı
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\emptyset$	: Faydalı akı
$\emptyset_p$	: Primer kaçak akısı
$\emptyset_s$	: Sekonder kaçak akısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : IEC60044-1'e göre ölçü akım transformatörlerinde akım ve faz hata sınırları.	6
Çizelge 2.2 : IEC60044-1'e göre koruma akım transformatörlerinde akım ve faz hata sınırları.	8
Çizelge 5.1 : Deneyde kullanılan akım transformatörlerinin etiket değerleri	37
Çizelge 5.2 : Deney düzeneğinin elektriksel gösterimine ait açıklamalar.....	42
Çizelge 5.3 : Deney düzeneği ölçüm noktaları ve ölçülen değerler.	42
Çizelge 5.4 : 1. Deney sonucu ölçüm değerleri.	44
Çizelge 5.5 : 1. Deney sonucu hesaplanan hata değerleri.....	45
Çizelge 5.6 : 2. Deney sonucu ölçüm değerleri.	46
Çizelge 5.7 : 2. Deney sonucu hesaplanan hata değerleri.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Ölçü transformatörlerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2 : Akım transformatörlerinin elektriksel gösterimi.....	9
Şekil 2.3 : Akım transformatörleri manyetik devre genel gösterimi	9
Şekil 2.4 : Akım transformatörleri eşdeğer devresi.	10
Şekil 2.5 : Direnç yükü için akım transformatörü fazör diyagramı.	10
Şekil 2.6 : 0.5 endüktif güç faktörü için akım transformatörü fazör diyagramı.	11
Şekil 2.7 : Akım transformatörü sekondere indirgenmiş basit eşdeğer devresi	12
Şekil 2.8 : Akım transformatörü hata fazör diyagramı.	14
Şekil 2.9 : B – H Eğrisi.	15
Şekil 2.10 : Hata oranı – Akım ilişkisi.	15
Şekil 2.11 : Düşük güçlü akım transformatörleri çalışma prensibi.	17
Şekil 2.12 : Düşük güçlü akım transformatörleri eşdeğer devresi.	17
Şekil 3.1 : Manyetik kutupların yönlenmesi.....	21
Şekil 3.2 : Histerisis çevrimi.....	22
Şekil 3.3 : Farklı dalga formlarına göre elde edilmiş histerisisiz çevrimleri.	23
Şekil 3.4 : Doyuma girmiş nüvede domenlerin yönlenmesi.....	24
Şekil 3.5 : Farklı frekanslar için B – H çevrimi.....	25
Şekil 3.6 : Mıknatıslanma eğrisinin başlıca bölgeleri.....	28
Şekil 4.1 : Konvansiyonel akım transformatörlerinin kullanıldığı bir panel.	32
Şekil 4.2 : Düşük güçlü akım transformatörlerinin kullanıldığı bir panel.....	33
Şekil 4.3 : Düşük güçlü akım transformatörlerinin yerleşimi.....	34
Şekil 5.1 : 1. Deney transformatörlerin yerleşimi.....	38
Şekil 5.2 : 2. Deney transformatörlerin yerleşimi.....	39
Şekil 5.3 : Akım transformatörlerinin fazlara bağlanması.....	39
Şekil 5.4 : 1. Deney, akım transformatörlerinin açısız bağlanması.....	40
Şekil 5.5 : 2. Deney, akım transformatörlerinin açılı bağlanması	40
Şekil 5.6 : Deney düzeneğinin elektriksel gösterimi	41
Şekil 6.1 : Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde çevirme oranı hatası	49

Şekil 6.2 : Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde faz açısı hatası	50
Şekil 6.3 : Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde bileşik hata	50
Şekil 6.4 : Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde çevirme oranı hatası.....	53
Şekil 6.5 : Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde faz açısı hatası	54
Şekil 6.6 : Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde bileşik hata.....	54

ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE KOMŞU FAZ AKIMLARININ AKIM TRANSFORMATÖRLERİNDE HATA DEĞERLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda boyutsal olarak giderek küçülen akım ve gerilim transformatörleri sayesinde, panel üreticileri panel boyutlarını küçültme yoluna girmişlerdir. Boyutlardaki bu küçülme ile faz – faz ve faz – toprak baraları arasındaki mesafeler de azalmış, daha önce ön planda olan elektrostatik etkilerin yanında panel içerisindeki elektromanyetik etkilerin de önemi arttırmaya başlamıştır. Bir elektrik panelinin en önemli bileşenlerinden biri akım transformatörleridir. Mal ve can güvenliğini sağlayan koruma akım transformatörleri ile fiyatlandırma ve izleme işlevlerini yerine getiren ölçme akım transformatörleri için elektrik panelinin beyni tabirini kullanmak yanlış olmaz. Akım transformatörlerinin bahsedilen ölçme ve koruma fonksiyonlarını sağlıklı yerine getirebilmesi için panel içerisindeki yerleşimi önem taşımaktadır. Panel boyutlarının giderek küçülmesiyle, akım transformatörleri ile faz hatları arasındaki mesafeler de azalmış, bu fazlardan geçen akımların akım transformatörüne etkisi artmıştır. Söz konusu fazlardan geçen akımlar ile akım transformatörünün bağlı olduğu fazın oluşturduğu bileşke manyetik alan nedeniyle, akım transformatörlerinde kısmi manyetik doyma meydana gelme ihtimali artmıştır. Meydana gelebilecek bu doyma sebebi ile akım transformatörlerinin hata değerleri de değişkenlik gösterebilmektedir. Bu tezin konusu olarak, dış fazların akım transformatörü hata değerleri üzerine etkisi incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan ilk deneyde, 40kA kısa devre akımına kadar çeşitli akım kademelerinde akım transformatörlerinin ölçüm değerleri kayıt altına alınarak hata değerleri hesaplanacaktır. Tezin ikinci aşamasında ise, giderek kullanımı artan toroidal tip akım transformatörlerinin, panel içerisinde yatay ve dikey ekseninde farklı açılar ile yerleştirilmesi durumunda akım transformatörlerinin hata değerlerinin değişimi incelenecektir. İlk deneydeki ile aynı olacak şekilde, 40kA kısa devre akımına kadar akım transformatörlerinin çeşitli akım kademelerinde ölçüm değerleri kaydedilip hata değerleri hesaplanacaktır. Tez kapsamında yapılan deneylere ait sonuçlar yorumlanacak ve gerekli çıkarımlar yapılacaktır.

ANALYSIS OF NEARBY PHASE CURRENT EFFECTS ON CURRENT TRANSFORMER ERRORS IN THREE PHASE SYSTEMS

SUMMARY

As the technology develops, current and voltage transformers are also become smaller in dimensions. As the transformers become smaller, switchgear manufacturers have chance to reduce the switchgear dimensions. Due to this reduction, distances between phase to phase and phase to neutral busbars are also decreases. With the smaller distances, electromagnetic effects become more important at switchgear design. One of the most important elements of switchgear is current transformers. It will not be wrong to call the current transformers as the brain of the switchgear, while they are dealing with protection functions and measurement functions. In order to work properly, it is important to place the current transformers correctly in switchgears. Due to reduction at switchgear sizes, the distance between phase lines become smaller and effects of phase currents on current transformers increases. Because of outer phase current's and main phase current's composite magnetic field, there can be some partial magnetic saturation on the magnetic core. This partial magnetic saturation can cause some deviation on current transformer's error values. As a subject of this thesis, effects of nearby phase currents on current transformers are going to be analyzed. Thesis consists of two parts. At 1st part, current transformer error values are going to be measured and calculated at different current levels up to 40kA. At the 2nd part, current transformers are going to be placed at different positions on the phase lines and different levels of current is going to be injected up to 40kA short circuit value. By doing this, effects of positioning of the current transformer on error values are going to be analyzed. Results and comments are going to be given at final sections.

1. GİRİŞ

Ölçü transformatörleri, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde yüksek değerde bir gerilimi ya da akımı, alçak gerilim ölçme ve koruma sistemlerinde kullanılabilir oranlara dönüştürmek üzere tasarlanmaktadır. Ölçü transformatörlerinin ana amacı enerji şebekesini ölçme veya koruma sisteminden izole etmektir. Bunun dışında ölçü transformatörlerinin genel kullanım amaçları iki başlık altında toplanabilmektedir. İzleme ve faturalandırma sistemleri için ölçme transformatörü olarak kullanıldığı gibi uygun tasarımlar ile enerji sistemlerinde koruma fonksiyonların yerine getirilmesi amacıyla kullanılabilir. Bu farklı uygulamaların gerekliliklerine göre ölçü transformatörleri tasarım olarak farklılık içerebilmektedir.

Genel olarak ölçme amaçlı kullanılan ölçü transformatörleri anma çalışma akım ve gerilim seviyelerinde daha hassas bir dönüştürme oranı gerektirirken, koruma ölçü transformatörleri daha doğrusal ve geniş bir aralıkta akım ve gerilim ölçümü yapması beklenmektedir. Sistemde meydana gelen kısa devre ya da aşırı gerilim gibi bir hata durumunda koruma ölçü transformatörünün çıkışları kontrol rölesine bilgi sağlar ve bu bilgiye dayanarak röle açma ya da kapama işlevlerini yerine getirir. Bu nedenle sistemin güvenliğinin ve güvenebilirliğinin sağlanabilmesi için koruma ölçü transformatörlerinin teknik özelliklerinin istenilen değerlerde olması gerekmektedir. Aynı şekilde ölçüm transformatörleri için de, sistem fiyatlandırması ve izlemesinin güvenilir bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan ölçüm transformatörlerinin hassasiyetinin istenilen değerlerde olması önemlidir. Ölçü transformatörlerinde genel olarak kullanılan sekonder akım seviyeleri 1-5 amper iken gerilim transformatörleri için sekonder çıkış gerilim seviyeleri 115-120 Volt seviyelerindedir [1]. Ölçü transformatörleri ile ilgili gerekli teknik şartlar IEEE, ANSI, IEC gibi uluslararası standartlarda tanımlanmış ve bazı ölçütler belirlenmiştir. Bir enerji sisteminin sağlıklı bir şekilde izlenebilmesi ve korunabilmesi için ölçü transformatörlerinin sağlıklı çalışması olmazsa olmaz bir gerekliliktir.

1.1 Tezin Amacı

Kullanım alanları oldukça geniş olan ve enerji sistemlerinin izlenmesi ve korunması gibi hayati rolleri üstlenen ölçü transformatörlerinin sağlıklı çalışması için standart testlerinin yanı sıra kullanıldığı gerçek fiziksel ortamın koşullarına göre incelenmesi gerekliliği açıktır. Yaygın olarak kullanılan IEC, ANSI gibi uluslar arası standartlarda ölçü transformatörlerinin teknik değerleri tek faz için tanımlı olmasına ve uygunluk testlerinin tek fazda yapılmasına karşılık, enerji sistemleri büyük oranda 3 fazlı sistem olarak çalışmakta ve ölçü transformatörleri de 3 fazlı sistemlerde diğer sistem bileşenleriyle birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca, ölçü transformatörlerinin kullanıldığı ortamlarda yer alan diğer bileşenlerin ölçü transformatörlerine olan etkisi standartlarda göz önüne alınmamıştır. Bu tez kapsamında, 3 fazlı bir sistemde kullanılan akım transformatörlerinin davranışları ele alınarak, transformatörlerin yan fazların akımları ve dış manyetik alanlar ile etkileşimi incelenecektir. Bu sayede akım transformatörlerinin kullanıldığı fiziksel ortamın transformatörün çalışmasına etkisi ve bu etkinin koruma ve ölçme fonksiyonlarına yansımaları hakkında değerlendirme yapılacaktır.

1.2 Tezin Kapsamı

Tezin ilk bölümünde tez konusu olan akım transformatörleri hakkında özet bilgiler verilmeye çalışılmıştır. İkinci bölümde ise, akım transformatörlerindeki hata oranları ile doğrudan ilgili olan manyetik doyma hakkında bilgi verilmiş ve gerekli açıklamalar yapılmıştır. Akım transformatörlerinin paneller içerisindeki yerleşimi üçüncü bölümde ele alınmıştır. Bu tez çalışmasının asıl konusu olan 3 fazlı sistemlerde akım transformatörlerinin davranışları ve çalışma koşullarında farklı fazlarda bulunan akım transformatörleri arasındaki hata oranlarının değişimi ile ilgili yapılan deneysel çalışma dördüncü bölümde ele alınmıştır. Ayrıca yine aynı bölümde tez konusu olan diğer bir deneysel çalışmaya yer verilmiş, kullanımı giderek yaygınlaşan ve kablo sistemlerinde kullanılan toroidal tip akım transformatörlerinin yatay ve dikey eksenlerde farklı açılar ile montajının yapılması durumundaki hata oranlarının değişimi incelenmiştir. Son bölümde ise yapılan deneyler ile ilgili sonuçlar değerlendirilmiş ve çıkarımlar yapılmıştır.

2. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ

2.1 Genel Bilgi

Ölçü transformatörlerinin ana amaçları; akım ve gerilimleri okunabilir ve işlenebilir değerlere indirgemek, ölçüm ve kontrol devresini enerji sisteminden izole etmek ve ölçme ve koruma sistemleri için standart akım ve gerilim değerleri sağlamak olarak verilebilir. Ölçü transformatörleri ana amacı akım ve gerilimleri ölçmek olan transformatörlerdir ve çalışma mantığı olarak güç transformatörleri için geçerli olan fiziksel ve elektriksel kurallar ölçü transformatörleri için de geçerlidir. Ölçü transformatörlerini işlev olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Gerilim transformatörleri: Ana kullanım amaçları enerji sistemindeki yüksek gerilimleri ölçülebilir daha düşük gerilimlere dönüştürmektir. Güç transformatörleri için geçerli olan denklem 2.1 gerilim transformatörlerinin çalışma ve kullanım mantığının da temelini oluşturur. Yüksüz bir transformatörde Denklem 2.1 geçerlidir.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Bu denklemde yer alan primer ve sekonder sarım sayılarının oranı gerilim dönüştürme oranını vermektedir. Bu denklemde gerilim transformatörü yüksüz durumda ideal kabul edilmiş ve tek gerilim düşümü kaynağı mıknatıslama akımının da etkisi ihmal edilerek çevirme oranı verilmiştir [2].

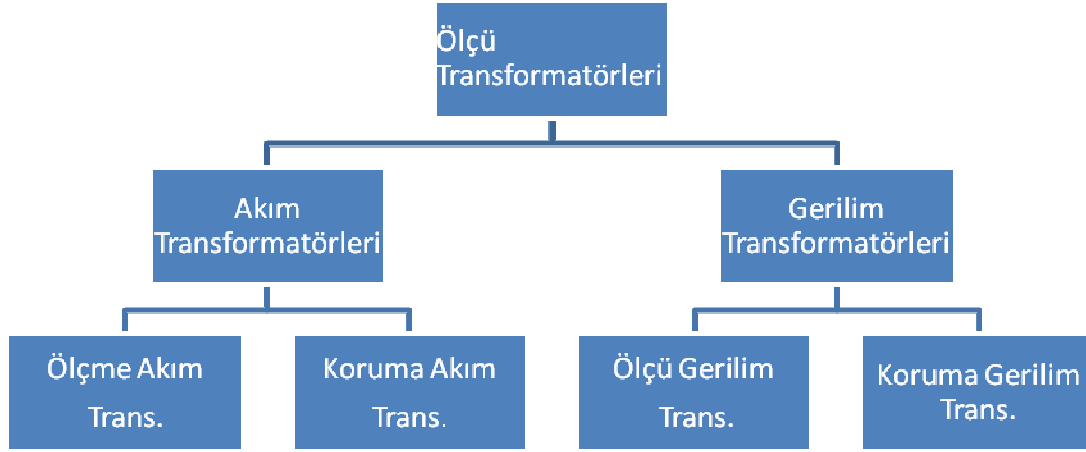
Akım transformatörleri: Akım transformatörlerinin ana kullanım amacı enerji sistemindeki doğrudan yöntemler ile ölçülemeyecek büyük akımları daha düşük akımlara dönüştürerek ölçme yapılmasını sağlamaktır. Ayrıca orta ve yüksek gerilim enerji sistemlerinde ölçme ve koruma sisteminin yüksek gerilim tarafından izole edilmesini de sağlarlar. Sekonderi kısa devre edilmiş yüksüz çalışan bir akım transformatörünün çevirme oranı Denklem 2.2 'deki gibi verilebilir [2].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ‘de sekonder ve primer sarım sayılarının oranı akım çevrim oranını vermektedir.

Ölçü transformatörleri besledikleri cihazların amacına göre;

- Koruma akım ve gerilim transformatörleri
- Ölçü akım ve gerilim transformatörleri, olarak ikiye ayrılmaktadır. Ölçü transformatörlerinin kullanım amaçlarına göre sınıflandırılmış şekli Şekil 2.1 ‘de görülebilmektedir [2].



Şekil 2.1: Ölçü Transformatörlerinin sınıflandırılması

2.1.1 Kullanım alanlarına göre akım transformatörü çeşitleri

2.1.1.1 Ölçme akım transformatörleri

Ölçme amaçlı akım transformatörleri; normal işletme koşullarında sınırlı bir aralıktaki sistem akımını sadece ölçme amacı taşımaktadır. Ölçme akım aralığı genellikle IEC 60044-1 standardına göre anma akımın %5 ile %120’sidir. Ayrıca ölçü akım transformatörlerinin, sekonderlerine bağlı ölçü aletlerinin izolasyon dayanımı ve akım taşıma kapasiteleri sınırlı olduğu için bunların zarar görmesini engellemesi gerekmektedir. Bu nedenle belirli bir akım değerinin üzerindeki akım değerlerini sekonder devreye yansıtmayacak şekilde tasarlanırlar.

Ölçme akım transformatörlerinden alınan akım bilgisi ile ampermetre, wattmetre vb. ölçü aletleri ile sayaçlar beslenmektedir. Bunun sonucu olarak enerji üretim ve tüketim miktarlarının doğru olarak belirlenmesi, izlenmesi sağlanmaktadır [3]. Ölçü akım transformatörleri ile ilgili tanımlamalar aşağıdaki gibidir.

Cihazın azami gerilimi; akım transformatörünün işletmeye alınabileceği sistemin azami gerilim seviyesini göstermektedir. Transformatörün dizaynı, izolasyon mesafeleri ve boyutları bu gerilim seviyesi dikkate alınarak yapılır. Bu gerilim değerine göre akım transformatörlerinin işletme gerilim seviyeleri [IEC 38], 1 dakika süreli şebeke frekanslı izolasyon gerilim seviyeleri ve darbe gerilim seviyeleri ise [IEC 60044-1]'de belirlenmiştir [1].

Çevirme oranı : Primer ve sekonder sargılar arasındaki nominal akım çevirme oranını belirtmektedir.

Hassasiyet (doğruluk) sınıfı: Primer akımının sekonder akımına indirgenmesi sırasında sekonder akımında oluşabilecek hata miktarının sınırlarını belirlemektedir. Akım ölçü transformatörü primer akımını sekonder akımına dönüştürülürken oluşabilecek iki tip temel hata vardır:

Akım hatası (%AH); efektif dönüştürme oranı hatasıdır,

$$\% AH = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p} \quad (2.3)$$

(2.3)'de K_n , anma dönüştürme oranıdır ($300/5A=60$), I_p ; primerden geçen gerçek akım değeri; transformatörün primerinden geçen akım değeri bağlı olduğu işletmenin/cihazın, yük durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden hatanın ölçüldüğü durumdaki primerden geçen akım değeri, I_s ; primerden I_p akımı geçerken sekonderden ölçülen akımdır.

Faz hatası (FH), ölçümdeki reaktif kayıplar nedeniyle oluşan faz farkı hatasıdır, birimi [dakika] veya [santiradyan]'dır. 1 dakikalık açı, derecenin 60'ta birine tekabül etmektedir.

$$\varphi_{FH} = \varphi_P - \varphi_S \quad (2.4)$$

(2.4) bağıntısındaki gibi primer akımının açısı ile sekonder akımının açısı arasındaki fark derece veya radyan cinsinden hesaplanarak dakika ya da santiradyana dönüştürülerek hesaplanır. Çizelge 2.2’de akım transformatörlerinin doğruluk (hassasiyet) sınıfına göre sağlaması gereken hata oranları gösterilmiştir [1].

Çizelge 5.1: IEC 60044-1’e göre ölçü akım transformatörlerinde hata sınırları

Doğruluk sınıfı (Accuracy class)	(±) Nominal akım yüzdesine göre akım hatası (%)				(±) Nominal akım yüzdesine göre faz açısı hatası (dakika)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0.2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0.5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1.0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Emniyet faktörü “n” (Security factor “FS”): Akım ölçü transformatörünün sekonderine bağlı ölçü aletlerinin aşırı akımlar ile zarar görmesini engellemek amacıyla belirlenmiş bir parametredir. Belirlenen bu katsayı ile primer akımının nominal değerinin belli bir katından büyük değerlerde transformatörün doyuma gitmesi sağlanmalıdır. Şöyle ki 300/5A’lık bir akım transformatöründe, eğer FS faktörü 5 olarak belirlendi ise, primerden nominal akımın 100 misli bir akım -30kA- geçtiğinde sekonderde, nominal sekonder akımının beş mislinden daha büyük -25A ve üzerinde- bir akım değeri görülmelidir. Bunun için primerden 1500A geçmeden önce transformatör doyuma girmelidir. Böylece sekonder akımının primer akımı ile aynı oranda yükselmesi ve sekondere bağlı ölçü aletlerinin aşırı akımlara maruz kalması sonucunda zarar görmesi engellenmiş olur. Transformatörün çalışma bölgesi bu parametreye uygun olarak mıknatıslanma eğrisinin bilek bölgesinde seçilir [1].

Sekonder yükü (burden): Akım transformatörünün hassasiyet (doğruluk) sınıfına uygun olarak ölçüm yapabileceği durumda, sekonderinde tüketilebilecek olan azami güç değerini VA olarak belirtir. Sekonder devrenin ihtiyaç duyduğu güç, bağlanacak olan tüm ölçü aletleri ve bağlantı kabloları için gereken toplam güçtür. Sekonderdeki iç kayıplar üretici tarafından ayrıca dikkate alınmalıdır. Belirlenen yük değerinin altında veya üzerinde güç tüketildiği durumlarda akım transformatörü doğruluk sınıfına uygun şekilde çalışamaz hale gelir.

Sürekli termik akımı (I_{cth}) : Transformatörün belirlenen ısınma sınırlarının dışına çıkmadan sürekli olarak çalışabileceği termal akım değerini belirtmektedir. Nominal çalışma akımının katları olarak belirtilir.

Kısa devre akımı (I_{th}): Transformatörün belirlenen kısa sürelerde fiziksel olarak hasara uğramadan termal olarak dayanabileceği maksimum akım miktarını belirler. Genellikle 1 saniye ya da 3 saniye süreli olarak belirlenir [1].

2.1.1.2 Koruma akım transformatörleri

Koruma amaçlı akım transformatörlerinin görevi, normal işletme koşulları dışında sistemde oluşabilecek kısa devre ve aşırı akımları belirli bir oranda sekonderlerine bağlı koruma ekipmanlarına, rölelere iletmektir. Bu gibi istenmeyen durumlarda koruma ekipmanlarına kısa süre içinde ve doğru bilgi vermeleri enerji sisteminin veya elektrik makinelerinin zarar görmemesi açısından hayati önem taşımaktadır. Normal işletme koşullarında da sınıfına uygun ölçüm yapması gerektiğinden çok daha geniş bir bölgede çalışmaktadırlar. Koruma akım transformatörlerinde ölçme akım transformatörlerine ek olarak bileşik hata tanımlıdır [2].

Bileşik hata (%ε_b); sadece koruma tipi akım transformatörleri için sınır değerleri belirlenmiş olup diğer hata tipleri gibi kararlı hal (steady state) için geçerlidir. Koruma akım transformatörlerinin; nominal akımının üzerindeki aşırı akımları, harmonikli akımları ve kısa devre akımlarını belirlenen bir değere kadar sekondere iletmesi gerekmektedir. İşte bu iletim sırasında oluşabilecek hata, bileşik hata ile tanımlanmaktadır. Aşırı akım ve kısa devre durumlarında, primer akımının ve/veya nüvenin saturasyon bölgesine yaklaşması nedeniyle sekonder akımının dalga formunun sinüzoidalliği bozulabilir. Bu yüzden sekonder ve primer akımlarının anlık değerleri dikkate alınarak Denklem 2.5'te verildiği gibi hesaplanır [1].

$$\varepsilon_b = \frac{100}{I_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (2.5)$$

Burada; i_p ; anlık primer akımını, i_s ; anlık sekonder akımını temsil etmektedir. Akım hatası efektif değerler dikkate alınarak hesaplandığından nonsinüsoidal şartları yeterince yansıtamamaktadır. Buna karşın faz hatası ve bileşik hatada anlık akım değerlerinden de yararlanıldığı için hem sinüzoidal hem de nonsinüsoidal şartları (akımın dalga şeklindeki kalıcı değişiklikleri) bir ölçüde yansıtabilmektedir [2].

Koruma akım transformatörlerini tanımlamak için aşağıdaki kavramları da açıklamak gerekir:

Saturasyon (doyum) akısı (Ψ_s); nüvenin saturasyon öncesi konumundan tam saturasyon konumuna gelmesi sırasında nüvede oluşan akının tepe değeridir. B/H eğrisinde B'deki %10'luk artışın H'ta %50'lik artışa neden olduğu noktadaki akı değeri olduğu kabul edilmektedir.

Kalıcı manyetik akı (remanent flux Ψ_r); akım transformatörünün manyetik devresini (nüveyi) doyuma götürebilecek miktarda bir uyarım akımının uygulanmasının ardından bu akımın kesilmesi ile birlikte 3 dakika sonunda halen nüvede bulunan (artık) manyetik akı miktarını ifade etmektedir.

Nominal indüklenen diz gerilimi (knee point e.m.f); primer terminal açık devre iken sekondere uygulanan şebeke frekanslı gerilim uygulandığında, gerilimdeki %10'luk artışa karşılık mıknatıslanma akımında azami %50 artışın görüldüğü asgari gerilim değerine denir. Koruma transformatörleri bilek bölgesi ile diz noktası arasındaki bölgede çalışırlar.

Koruma amaçlı akım transformatörlerinde hassasiyet sınıfları ve bunlara ilişkin hata miktarları Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Tablodan da görüleceği üzere ölçü akım transformatörlerinden farklı olarak koruma akım transformatörlerinde hata ölçümü anma akım ve anma yükünde yapılmaktadır [1].

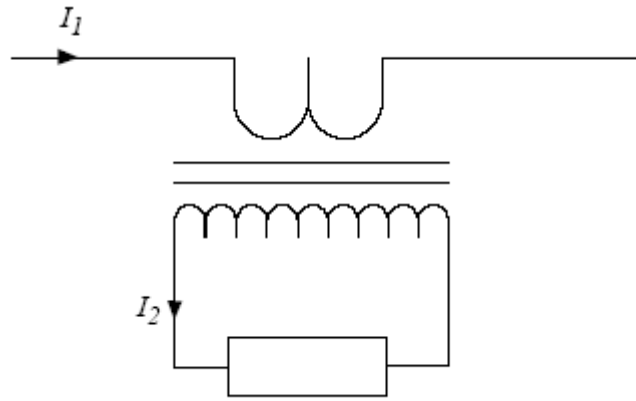
Çizelge 5.2: IEC 60044-1'e göre koruma akım transformatörlerinin hata limitleri

Doğruluk sınıfı	Nominal primer akımındaki hata (%)	Nominal primer akımında faz açısı hatası		Hassasiyet sınıfı aşırı akım faktöründeki bileşik hata değeri (%)
		dakika	santiradyan	
5P	± 1	± 60	± 1.8	5
10P	± 3	-	-	10

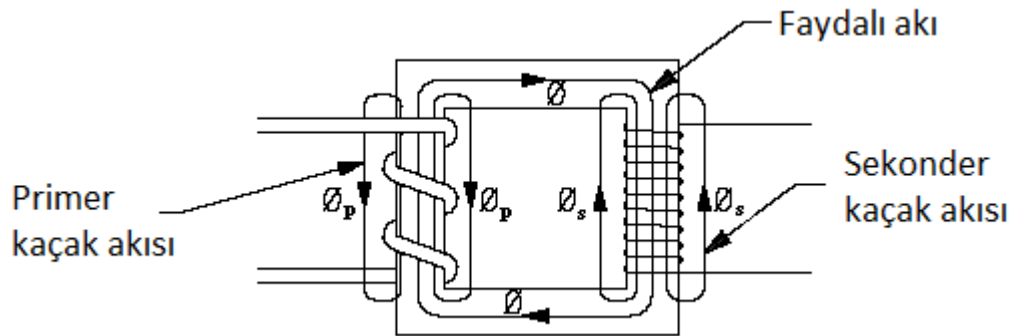
Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü (ALF); akım transformatörlerinin anma akımının belirli bir katına kadar tam doyum bölgesine girmeden, bileşik hata sınırları içinde çalışması gerekir. ALF değeri, sınır akım değerini anma akımın çarpan katsayısı olarak ifade etmektedir.

2.2 Akım Transformatörlerinin Çalışma Prensibi

Çalışma prensipleri genel transformatörlerin elektriksel özellikleri ile aynı olsa da, akım transformatörleri birçok açıdan diğer transformatörlerden farklılık göstermektedir. Primer devre, şebekeye seri bağlıdır ve sekonder yükünden bağımsız olarak primer akımına karşılık gelen sekonder akımı sabit bir değerdedir. Sekonder sarım sayıları primere göre çok fazla olduğundan sargı uçları açık bırakılırsa sekonder sargıda çok yüksek gerilimler endükelenebilir. Bunu engellemek için sekonder uçları açık bırakılmamalıdır. Şekil 2.2 'de bir akım transformatörünün elektriksel gösterimi Şekil 2.3'te ise manyetik devre genel olarak gösterilmiştir [3].



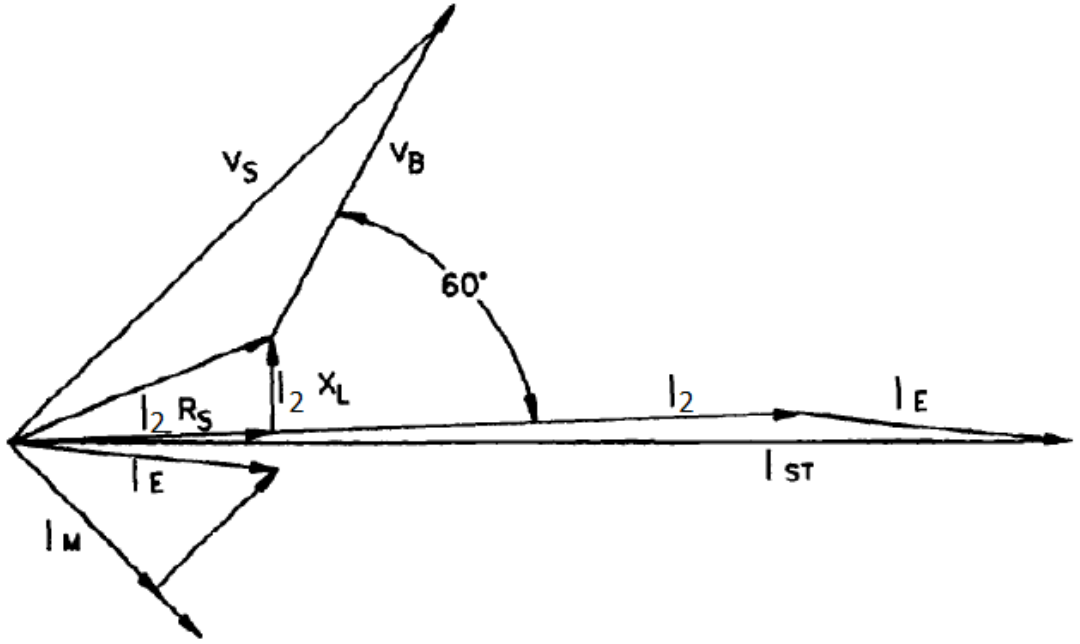
Şekil 2.2: Akım Transformatörünün elektriksel gösterimi



Şekil 2.3: Akım transformatörleri manyetik devre genel gösterimi

2.2.1 Akım transformatörleri eşdeğer devresi ve fazör diyagramları

Şekil 2.4'te akım transformatörlerine ait basitleştirilmiş eşdeğer devresi verilmiştir. Primer kaçak reaktansı gerekli hesaplamalara etkisinin ihmal edilebilir olması nedeniyle eşdeğer devrede gösterilmemiştir [4].

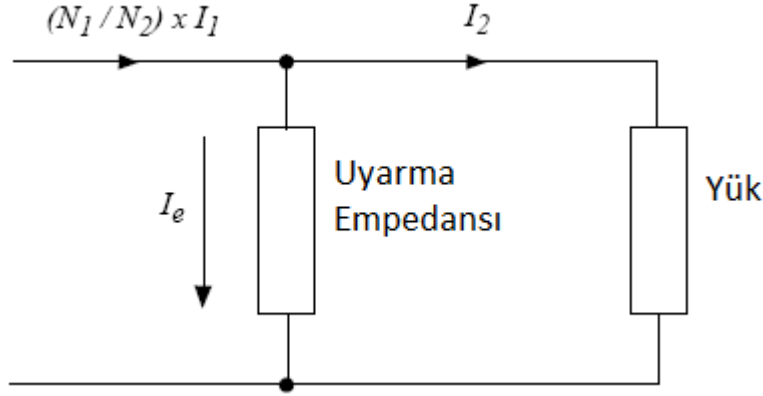


Şekil 2.6: 0.5 endüktif güç faktörlü yük için akım transformatörü fazör diyagramı

Akım transformatörünün yük uçlarındaki gerilim düşük olduğunda uyarma akımı da düşüktür. Bu durumda sekonder akımında herhangi bir bozulma görülmez. Sekonder uçlarındaki gerilimin akımın yada yükün artması neticesinde yükselmesi durumunda akım transformatörü nüvesindeki akı da artar. Bu artış devam ettiği takdirde nüve manyetik olarak doyuma girer ve sekonder akımı dalga şeklinde bozulma meydana gelir [5,6]. Manyetik devredeki bu doyma etkisi ileriki bölümlerde incelenecektir.

2.3 Akım Transformatörlerinde ölçme hataları

İdeal transformatörler her sarım için aynı gerilimi endükler. Aynı zamanda ideal transformatörlerde primer ve sekonder amper – sarımları eşittir. Bu özellikler sayesinde transformatörler herhangi bir gerilim ya da akım değerini istenilen bir değere dönüştürebilir. Eğer uyarma akımı ihmal edilirse akım transformatörü primer akımını hatasız olarak sekonder akımı ile ölçmemize olanak sağlar. Buradaki çevirme oranı Denklem 2.2 'ye göre belirlenebilmektedir. Fakat gerçek durumda uyarma akımını ihmal etmek transformatör çevirme oranı hatası açısından mümkün değildir. Şekil 2.7 'de sekondere indirgenmiş olarak akım transformatörünün basit eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.7: Akım Transformatörü Sekondere İndirgenmiş Basit Eşdeğer Devresi

Verilen eşdeğer devreye göre primer devreden geçen akımın tamamı sekonder devreden geçmemektedir. Bu akımın bir kısmı nüvede uyarma akımını karşılamak için harcanır. Bu da primer akımının tam bir şekilde sekonder tarafa yansıtılamadığı anlamına gelmektedir. Bu durumda okunan sekonder akım Denklem 2.7 ‘da verilmiştir.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \times I_1 - I_E \quad (2.7)$$

Dönüştürmedeki bu hata aynı anda hem akım genliğinde hem de faz açısında görülür. Akımın genliğinde meydana gelen hataya çevirme oranı hatası, faz açısında meydana gelen hataya ise faz açısı hatası denir [7]. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da eşdeğer devrenin fazör gösterimi verilmiştir.

Verilen hata tanımına göre, sekonder akımı yüksek olduğunda çevirme oranı hatası pozitif ve sekonder akımı fazör olarak öndeyse faz açısı hatası pozitif olarak kabul edilir.

2.3.1 Akım transformatörlerinde ölçme hatalarının hesaplanması

Akım transformatörlerinin eşdeğer devresi ve hata hesaplarının yapılabilmesi için gerekli parametreler Şekil 2.4 'te verilmiştir. Primerde meydana gelen gerilim düşümü uyarma akımını ve hataları etkilememektedir. Bu yüzden primer devreye ait devre parametreleri eşdeğer devrede gösterilmemiştir. Sekonder devrede ise reaktans ihmal edilmiş ve sadece sargı direnci R_s göz önünde bulundurulmuştur. Uyarma devresi ise paralel birer reaktans ve direnç ile gösterilmiştir. Uyarma akımının aktif ve reaktif akımları I_μ ve I_f olarak devrede verilmiştir.

Akım transformatörü hata hesaplanması dört adımda yapılabilir;

Sekonderde indüklenen gerilim Denklem 2.8 yardımıyla bulunur.

$$E_2 = I_2 \times Z_B [V] \quad (2.8)$$

Burada Z_B toplam sekonder empedansdır ve Denklem 2.9 yardımıyla bulunabilir.

$$Z_B = \sqrt{(R_s + R_B)^2 + X_B^2} \quad (2.9)$$

E_2 'nin hesaplanması için gerekli akı yoğunluğu Denklem 2.10 yardımıyla bulunabilir.

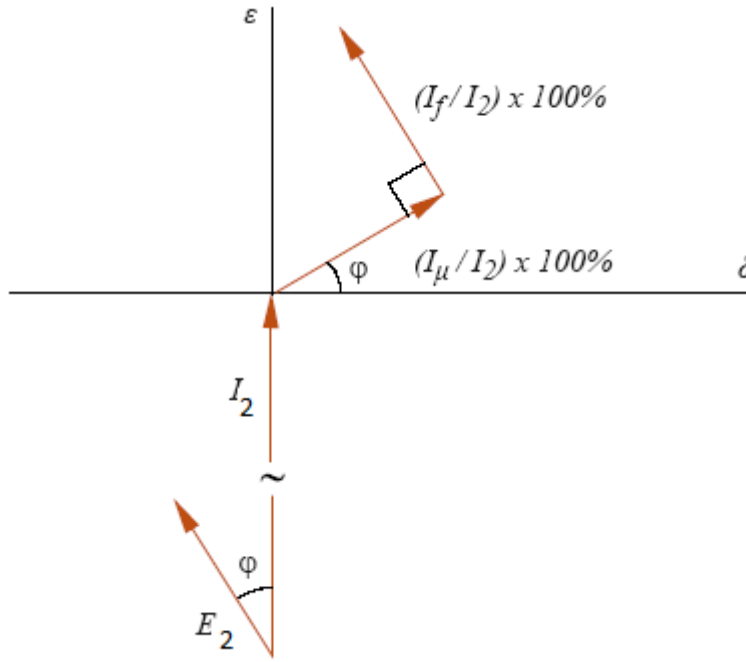
$$B = \frac{E_2}{\pi \times \sqrt{2} \times f \times A_j \times N_2} \quad (2.10)$$

B manyetik akısının oluşabilmesi için I_μ ve I_f akımları önem taşımaktadır. Bu sebeple manyetik devreye ait manyetik verilerin bilinmesi gerekmektedir. Bu veriler manyetik devreye ait B-H eğrilerinden elde edilebilir. Verilen eğrilerden H_μ ve H_f çıkartılabilirse Denklem 2.11 ve Denklem 2.12 yardımıyla I_μ ve I_f değerleri hesaplanabilir.

$$I_\mu = H_\mu \times \frac{L_j}{N_2} [A] \quad (2.11)$$

$$I_f = H_f \cdot \frac{L_j}{N_2} \times [A] \quad (2.12)$$

Son aşamada Şekil 2.8 ‘de verilen fazör diyagramından yararlanarak hata oranları hesaplanabilir. I_μ ve I_f vektörleri sekonder akımının yüzdesi olarak verilmiştir. Burada referans I_2 vektörü ile E_2 vektörleri arasındaki φ açısı faz açısı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 2.13 ‘deki şekilde ifade edilebilir. I_μ bileşeni E_2 ’ye göre 90 derece geride ve I_f bileşeni ise E_2 ile aynı fazda yer almaktadır [2,4].

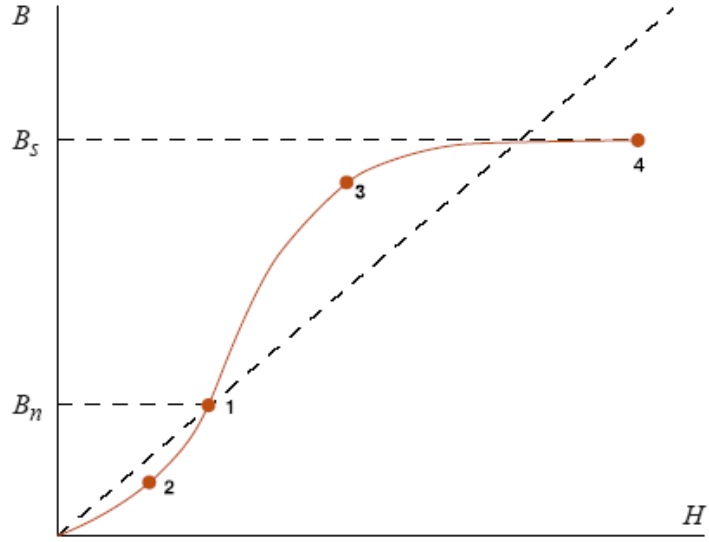


Şekil 2.8: Akım transformatörleri hata fazör diyagramı

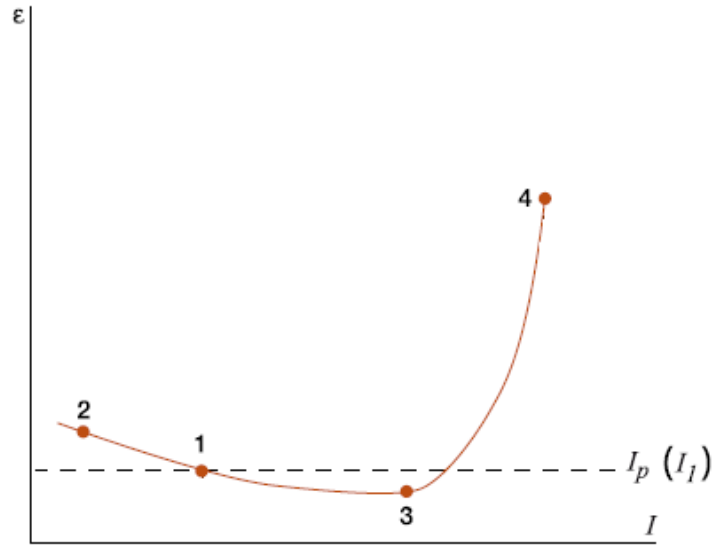
$$\varphi = \frac{X_B}{R_s + R_B} \quad (2.13)$$

2.3.2 Hata oranlarının akım ile değişimi

Bir önceki bölümde verilen hata hesabı aynı sekonder yük değeri için iki farklı akım değeri için hesaplanırsa hata değerlerinin de farklı olduğu görülecektir. Bunun nedeni ise manyetik nüvenin non-lineer karakteristikte olmasıdır. Uyarma eğrisinin lineer olması durumunda hata değerleri de sabit olacaktır. Şekil 2.9 ‘da B-H eğrilerinin orijinal hali ve lineer olması durumu verilmiştir.



Şekil 2.9: B-H Eğrisi



Şekil 2.10: Hata oranı – Akım İlişkisi

Şekil 2.10 ‘da verilen hata oranı ve akım değerinin ilişkisini gösteren eğriye göre, akım değeri arttıkça hata oranı azalmaktadır. Verilen noktalardan, 1, nominal primer akım noktası, 2, nominal primer akım değerinden düşük bir akım noktasını, 3, manyetik devrenin doyuma girmeye başladığı yani dirsek bölgesi noktasını, 4 ise manyetik devrenin tamamen doyduğu noktayı göstermektedir. Bu akım değeri 3 numaralı noktaya gelene kadar devam eder. 3 numaralı noktada ise nüve doyuma girmeye başlar ve bu noktadan sonra hata değeri(ϵ) akım değeri ile birlikte hızlı bir şekilde yükselir [8].

2.3.3 Amper – Sarım’ın hata oranı üzerindeki etkisi

Amper – Sarım azaltıldığında akım transformatörü hata oranları da Denklem 2.14 oranında artmaktadır.

$$\varepsilon \approx k \times \frac{1}{(AN)^2} \quad (2.14)$$

Ayrıca nüve üzerindeki manyetik yol uzadıkça hata oranı da Denklem 2.15 oranında artar.

$$\varepsilon = k \times L_j \quad (2.15)$$

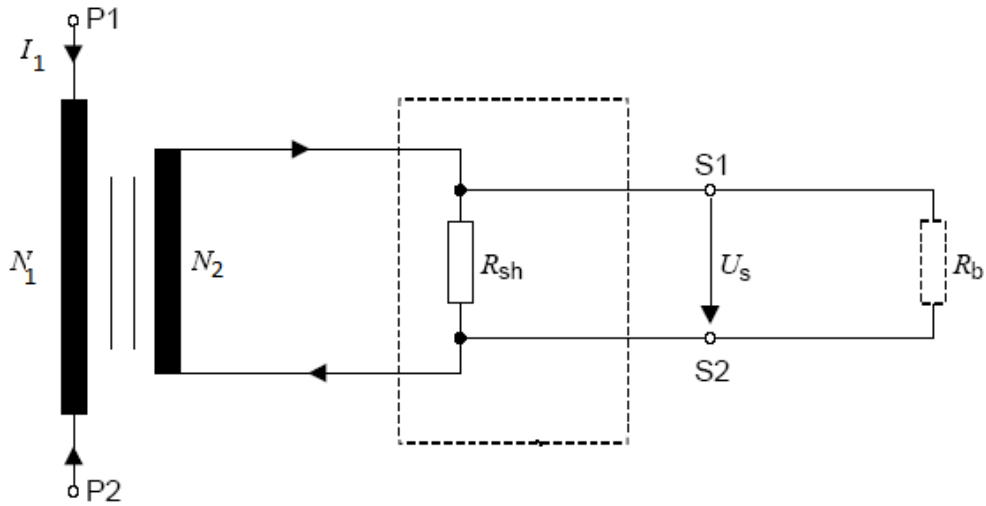
2.4 Düşük Güçlü Akım Transformatörleri (DGAT)

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte akım transformatörlerinin yerini daha ekonomik ve kullanışlı olan akım sensörleri almaya başlamıştır. Fakat konvansiyonel akım transformatörleri yüksek güvenilirlikleri sayesinde halen birinci tercih olarak kullanılmaktadır. Akım sensörlerindeki bu gelişmeleri kontrol etmek ve hızlandırmak adına uluslararası standartlar komitesi IEC 60044-1 Endüktif Akım Transformatörleri Standart’ına ek olarak 2002 yılında IEC 60044-8 Elektronik Akım Transformatörleri Standardı’nı yayınlamıştır [9].

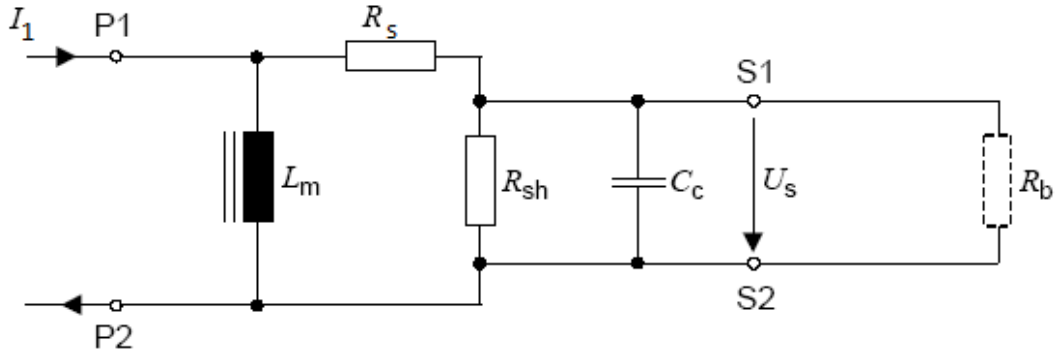
Düşük güçlü akım transformatörü (DGAT) konvansiyonel akım transformatörlerinden türetilmiş bir akım transformatörüdür. Düşük giriş gücü gereksinimleri sayesinde konvansiyonel akım transformatörlerinin tüm özelliklerini karşıladıkları gibi ölçme aralıkları çok daha geniş ve doyma akımları çok daha yüksektir. Güç tüketimindeki düşüş, kısa devre arıza akım seviyelerine kadar doyuma girmeden yüksek hassasiyetle ölçme imkanı sağlamaktadır. Geniş ölçme aralıklarına sahip olmalarının yanı sıra konvansiyonel akım transformatörlerine göre DGAT’lar çok daha düşük boyutlarda imal edilebilirler. Ayrıca ölçme ve koruma fonksiyonu aralıklarını hepsini karşılayabildiğinden bu iki fonksiyon için tek bir transformatör kullanılabilmektedir.

DGAT'lar genel olarak endüktif bırakım transformatörünün sekonder çıkışlarına şönt bir direncin bağlanmasıyla oluşturulur. Buradaki şönt direnç DGAT'ın bir iç elemanıdır ve ölçme fonksiyonlarının yerine getirilebilmesi ve sistemin güvenilirliği için büyük önem taşımaktadır. DGAT çalışma prensibi bu şönt direnç üzerinde oluşan gerilimin okunması yoluyla ölçmeye dayanmaktadır [10].

Sisteme bağlanan şönt direnç transformatörün güç tüketimini mümkün olduğunca 0'a yakın olacak şekilde bir tasarım yapılmalıdır. Sekonder akımı, uçlarına bağlı şönt direnç üzerinde primer akımı ve faz açısına bağlı bir gerilim düşümüne neden olur. İç güç tüketiminin azalmasıyla transformatörün ölçme aralığı artışı gibi hassasiyeti de artarak ideale yakın bir hal almaktadır. Şekil 2.11'de düşük güçlü akım transformatörlerinin çalışma prensibi ve Şekil 2.12'de eşdeğer devresi verilmiştir [11].



Şekil 2.11: Düşük güçlü akım transformatörleri çalışma prensibi



Şekil 2.12: Düşük güçlü akım transformatörleri eşdeğer devresi

Burada verilen devre parametreleri;

Düşük güçlü akım transformatörleri için dönüşüm formulleri Denklem 2.16, 2.17 ve 2.18’de verilmiştir.

$$U_s = R_{sh} \times \frac{N_1}{N_2} \times I_1 \quad (2.16)$$

$$I_1 = K_n \times U_s \quad (2.17)$$

$$K_n = \frac{1}{R_{sh}} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (2.18)$$

3 AKIM TRANSFORMATÖRLERİNDE DOYMA

Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde, düşük çevirme oranlı akım transformatörlerinin yüksek arıza akımlarında doyuma girmesi büyük risk oluşturmaktadır. Doyma durumunda akım transformatörlerinin davranışlarının değiştiği ve ölçme – koruma fonksiyonlarının yerine getirilmesinde yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu hatalar üretim ve tüketim tesislerinde maddi hasarlara sebep olabildiği gibi kritik cihazların hasara uğramasına neden olarak büyük bekleme zamanlarına sebebiyet verebilmektedir. Akım transformatörlerinde meydana gelen manyetik doymaları engellemenin birçok yolu olmasına rağmen bunların büyük bir kısmı ekonomik olarak uygun bulunmamaktadır.

Manyetik devrede, i_m endüktif akımının geçmesinin sebebi, manyetik malzemenin L_m endüktansıdır. L_m endüktansı, histeresiz etkisi adı verilen devreden geçen akıya bağlı olarak lineer olmayan bir değişim göstermektedir. Primerden geçen akım değiştikçe (manyetik devrenin akısı da değişeceğinden) L_m endüktansı nonlineer değişim göstereceği için mıknatıslanma kayıpları ve buna bağlı olarak akım transformatörünün hata değerleri değişebilecektir. Bu nedenle akım transformatörünün çalışma şekli, manyetik devrenin non-lineer değişimi ile doğrudan ilgili olup bu durumun ayrıca incelenmesi gerekmektedir [12].

3.1 Manyetik Doyma Etkisinin İncelenmesi

Histeresiz ve doyma etkisinin irdelenebilmesi için öncelikle nüvenin endüktansının (L_m) non-lineer değişimini ifade eden bağıntının elde edilmesi gerekmektedir. Böylece bu bağıntı üzerinden, L_m 'nin değerinin, doğrusal olmayan bir değişim göstermesinin nedeni ortaya konulmaya çalışılacaktır. Buna bağlı olarak ferromanyetik malzemenin karakteristik özelliği olan histeresiz çevrimi, doyma etkisi ele alınacaktır.

Söz konusu bağıntı, elektrik devre temellerinden bilinen endüktans akımı bağıntısı yardımıyla çıkarılabilir:

R_c kablo direnci, ihmal edilebileceği için uyarma akımı I_E , L_m 'den geçen mıknatıslanma akımı I_m 'ye eşit kabul edilebilir.

$$i_m = \frac{1}{L_m} \int e \cdot dt \quad (3.1)$$

$$e = N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.2)$$

(3.1) denklemi, (3.2) aracılığıyla yeniden düzenlenirse;

$$i_m = \frac{1}{L_m} \cdot N \cdot \varphi \quad (3.3)$$

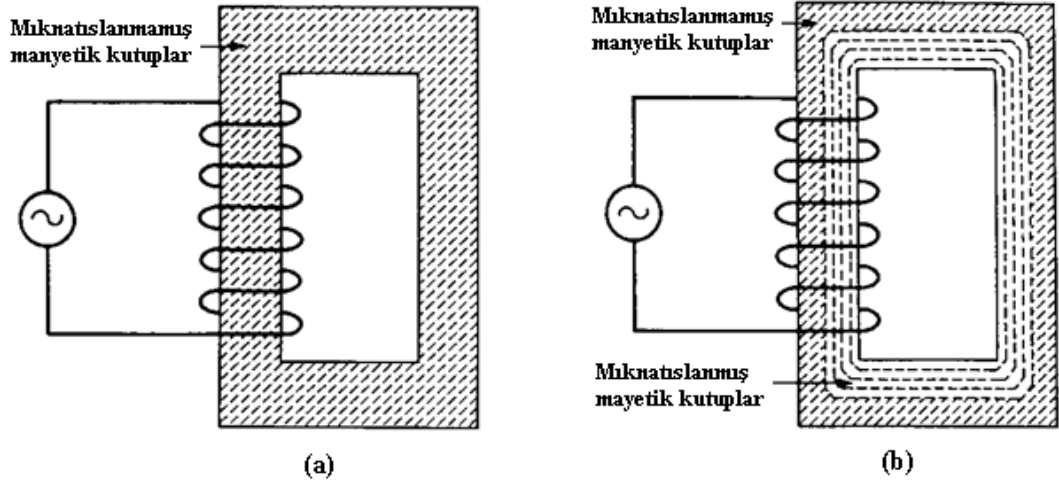
elde edilir.

$$\varphi = B \cdot A_j \quad , \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad \text{ve} \quad H = \frac{N_2 \cdot I_m}{L_j} \quad \text{olduğundan (3.3) denklemi (3.4)'teki}$$

gibi yazılarak L_m 'nin değişimini gösteren bağıntı elde edilmiş olur.

$$L_m = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2^2 \cdot A_j \cdot \frac{1}{L_j} \quad (3.4)$$

(3.4)'teki bağıntıda nüvenin bağıl manyetik geçirgenliğini ifade eden μ_r haricindeki parametreler sabit katsayılardır. μ_r ise nüveyi oluşturan malzemenin cinsine ve ferromanyetik malzemenin atomik dipol (manyetik kutup) yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Ferromanyetik nüveden akı geçebilmesi için malzemenin atomik dipollerinin yönlenmesi gerekmektedir. Dipolleri yönlenen ferromanyetik malzeme mıknatıslanmış olur. Yönlenmenin olması sırasında nüvede bir takım kayıplar ve buna bağlı olarak ısınmalar meydana gelir. Söz konusu kayıplar; çekirdeğin mıknatıslanmasını sağlayan reaktif kayıplar ve mıknatıslanması ile malzemenin ısınmasına yol açan aktif demir kayıplarıdır. Şekil 3.1'te AC kaynakla beslenen bir bobinin manyetik malzemesinin dipollerinin yönlenmesi sembolize olarak gösterilmektedir [1,13].

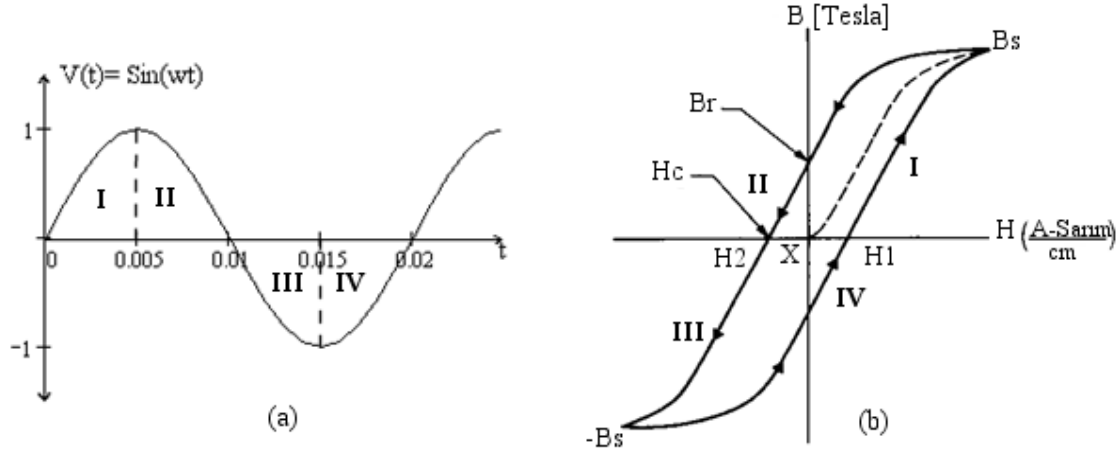


Şekil 3.1: Manyetik kutupların yönlenmesi

Mıknatıslanmış domenler, nüveden geçen manyetik akıyı göstermektedir. Ferromanyetik malzemenin manyetik kutuplarının yönlenebilme kapasitesi, karakteristiği nüvenin bağıl manyetik geçirgenliği (μ_r) ile ifade edilmekte olup $\mu_r \gg 1$ 'dir. Bununla birlikte μ_r , akı iletme kapasitesi olarak da tanımlanabilir ve akı yoğunluğunun alan şiddetine oranını gösteren (3.5) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (3.5)$$

Çekirdeğin bağıl manyetik geçirgenliği, çekirdekten geçen akının şiddetine, yoğunluğuna, akı kaynağının özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim doğrusal olmayıp histerisiz eğrisi ya da diğer bir deyişle B-H eğrisi ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 3.2: Histerisiz çevrimi

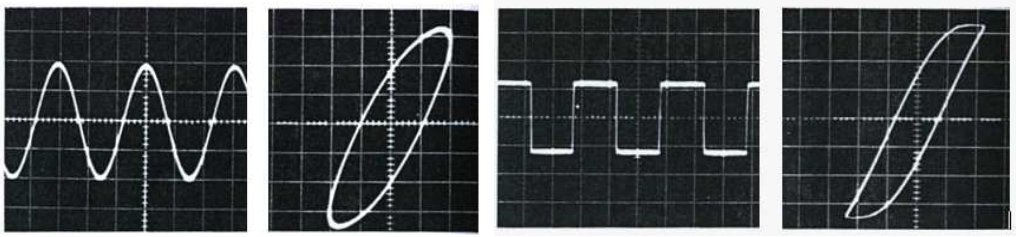
Sinüzoidal bir kaynak için manyetik bir malzemenin mıknatıslanması ve mıknatısiyetinin kaybolması ile ilgili tam çevrim, Şekil 3,2'daki histerisiz çevrimi ile gösterilmektedir. Nüve sinüzoidal bir kaynağın ürettiği manyetik alan şiddetine maruz kaldığında Şekil 3.2'da gösterildiği üzere kaynağın her çeyrek alternansında, histerisiz çevriminin bir bölgesindeki eğri elde edilmektedir. Histerisiz çevrimi, manyetik malzemenin cinsine, etkisinde kaldığı ve içinden geçen manyetik alanın dalga formuna, frekansına, sıcaklığa bağlı olarak oluşmaktadır.

Çekirdeğin başlangıçta nötr olduğu (dipollerin hiç yönlenmemiş olduğu) kabul edilirse; manyetik alan şiddeti H arttırıldıkça, manyetik akı yoğunluğu B de (başka bir ifade ile çekirdeğin endüksiyonu) artar ve X noktasından B_s saturasyon noktasına kadar kesikli çizgi boyunca nonlinear bir eğri elde edilir. Elde edilen ilk eğri mıknatıslanma eğrisi olarak düşünülebilir. Nonlinear mıknatıslanma eğrisi ancak sınırlı bir bölgede (iki kıvrılma bölgesinin arasında) lineer değişim göstermektedir. Sonrasında H azaltılacak olursa B de bir azalma gösterir ve B_s noktası ile H_2 noktası arasındaki eğri oluşur. Ancak görüldüğü üzere H azaltılarak elde edilen eğri ile, H arttırılarak elde edilen eğri çakışmamakta, tam tersine farklı bir yol izlemektedir. İkinci eğrinin B eksenini kestiği B_r noktası, $H=0$ olduğu anda çekirdekteki artık (remenans) akı yoğunluğunu göstermektedir. Bu durum malzemenin maruz kaldığı manyetik alan şiddeti ortadan kalkmasına rağmen hala B_r kadar artık akı dolayısıyla akı yoğunluğu bulunduğu anlamına gelmektedir. Mıknatısiyetin ortadan kalkabilmesi için negatif yönde H_2 noktasına denk gelen H_c (coercive force) kadar zorlayıcı manyetik alan şiddetinin uygulanması gerekmektedir.

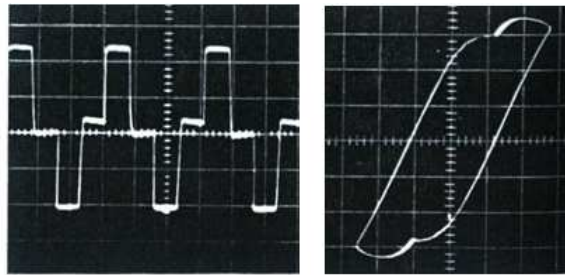
Negatif yönde doyuma gidene kadar H azaltılmaya devam edilirse malzeme birinci eğrinin tam tersi konumunda mıknatıslanır. Ters yöndeki bu mıknatıslanma sıfırlanmak üzere H artırıldığında H_1 noktasına gelinerek dördüncü eğri elde edilmiş olur. Bu şekilde H artırılıp azaltılmaya devam edilecek olursa histerisiz çevrimi ardıl izlem gösterdiğinden dört bölgedeki B-H değişimini gösteren eğrilerin birbirleri ile çakışmadığı görülür. Bunun da nedeni her seferinde domenlerin yönlenmesinin, malzemenin başlangıçtaki konumuna göre değil bir önceki konumuna göre olmasıdır.

Nüvenin bir kez mıknatıslandıktan sonra mıknatısiyetini ortadan kaldırmak için zorlayıcı manyetik alan şiddetinin uygulanmasının gerekmesi enerji kaybı anlamına gelmektedir. Bu nedenle histerisiz çevriminin içindeki kapalı alan nüvedeki enerji kaybını göstermektedir [2].

Şekil 3.3'te aynı manyetik çekirdek için farklı dalga formuna ve şekil faktörüne sahip akım kaynakları ile elde edilmiş histerisiz çevrimleri yer almaktadır. Bir alternatif dalga formunun şekil faktörü; karekök ortalama değerinin, ortalama değerine oranıdır ve dalga şeklini tanımlamakta kullanılmaktadır.



(a) Sinüzoidal dalga için histerisiz, (b) Kare dalga için histerisiz eğrisi
şekil faktörü=1.11 şekil faktörü =1



(c) Ortalama değeri sıfırdan farklı kare dalga için histerisiz eğrisi, şekil faktörü =1.31

Şekil 3.3: Farklı dalga formlarına göre elde edilmiş histerisiz çevrimleri

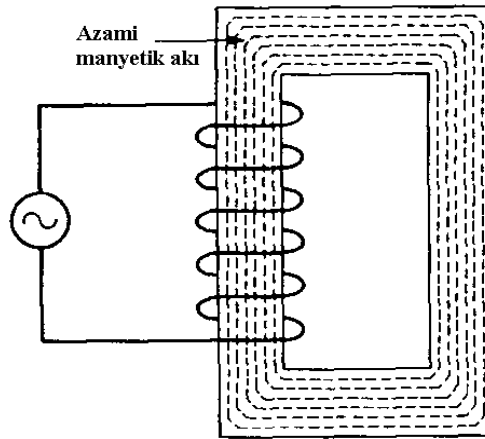
Şekil 3.3 (a)'da nüvenin maruz kaldığı manyetik alan şiddetinin dalga formu sinüzoidal iken elde edilen B-H çevrimi görülmektedir. Birinci bölgedeki eğrinin H eksenini doğrultusunda hiç düz çizgi çizmeden ikinci bölgeye geri dönmesi, (aynı şekilde 3. bölgeden 4. bölgeye geçişte de) kaynağın nüveyi doyum bölgesinde çalıştırmadığı anlamına gelmektedir.

(b)'de ise şekil faktörü =1 olan kare dalga için B-H çevrimi görülmektedir. Sinüzoidal kaynaktan farklı olarak kare dalga kaynağının nüveyi az da olsa doyum bölgesinde çalıştırdığı görülmektedir. Ayrıca kare dalga'nın iniş çıkış anlarına denk gelen histerisiz çevriminin birinci ve üçüncü bölgelerinde, eğrinin lineer olduğu görülmektedir.

(c)'de ise şekil faktörü = 1.31 ve ortalama değeri sıfırdan farklı olan kare dalga'nın B-H çevrimi yer almaktadır. Ortalama değeri sıfırdan farklı olduğu için diğer kare dalgalardan farklı olarak DC bileşen içermektedir. Bu nedenle artık mıknatıslanma (B_r) diğerlerine göre daha büyüktür ve kapalı çevrim alanı diğerlerine göre daha büyük olduğundan nüvede harcanan enerji de daha fazladır [2].

3.1.1 Doyuma etkisi

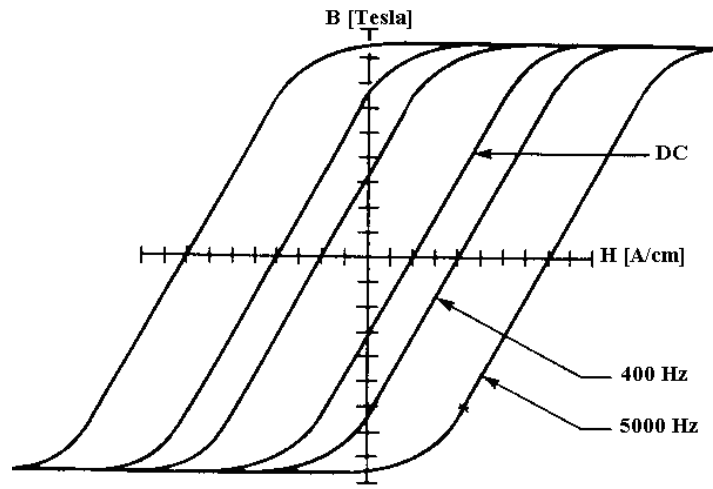
Çekirdeğin domenlerindeki yönelme, bütün dipollerin yönelmesine kadar devam eder. Bütün manyetik dipoller yönlendikten sonra manyetik alan şiddeti ne kadar arttırılsa da manyetik akı yoğunluğu B_s 'den daha fazla artmaz. Bu da söz konusu çekirdeğin üzerindeki sarımlarda (akım transformatörü için sekonderde) daha fazla gerilim indüklenemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu duruma nüvenin doyuma, saturasyona (saturation) girmesi adı verilir.



Şekil 3.4: Doyuma girmiş manyetik dipollerin yönelmesi

Şekil 3.4.'de bütün dipolleri yönlenmiş, doyuma girmiş dolayısıyla azami akının geçmekte olduğu ferromanyetik nüve sembolize edilmektedir. Doyum bölgesinde ve/veya yüksek frekanslarla çalışan nüvede, lineer bölgedekine oranla daha fazla ısınmalar söz konusu olur, hatta uzun süreli çalışmalarda aşırı ısınmalar ortaya çıkarak akım transformatörünün sekonder devresinin izolasyonun zarar görmesine neden olabilir.

Daha öncede bahsedildiği üzere kaynağın frekansı B-H çevrimini etkiler; frekansın artması nüvenin daha geç doyuma girmesini sağlar. Şekil 3.5'da aynı nüvenin farklı frekanslar için çıkartılmış histerisiz eğrisi yer almaktadır.



Şekil 3.5:Farklı frekanslar için B-H çevrimi

Şekilde görüldüğü gibi frekans arttıkça nüveyi mıknatıslamak ve saturasyona sokmak için uygulanması gereken manyetik alan şiddeti ve artık mıknatısiyet de artmaktadır [14].

3.1.2 Doyma faktörü ve doyma zamanı

Doyma etkisi akım transformatörü tasarımı yapılırken dirsek noktası gerilimini beklenen maksimum arıza akımından büyük seçilerek önlenebilir. Dirsek bölgesi gerilimi standart hata sınıfının gerektirdiğinden %50 ya da %75 daha yüksek alınabilir. Fakat daha yüksek dirsek noktası gerilimleri için mekanik boyutlarda ve akım transformatörünün imalatında ekonomik sıkıntılarla karşılaşılabilir [15].

Doyma etkisini aşağıdaki noktalara dikkat edilerek önlemek mümkündür;

- a) Alternatif akım kaynaklı doymayı önlemek için akım transformatörü sekonder doyma gerilimi V_X 'i karşılayabilmelidir.

$$V_X > \frac{I_2}{K_n} (R_B + X_L + R_S) \quad (3.6)$$

- b) Doğru akım bileşenli doyma etkisini önlemek için gerekli doyma gerilimi Denklem (3.7)'de verilmiştir.

$$V_S > \frac{I_2}{K_n} \times (R_B + X_L + R_S) \left(1 + \frac{X}{R} \right) \quad (3.7)$$

Eğer akım transformatörü yükü aynı zamanda endüktif bir yük ise doğru akım bileşeni nedenli doyma etkisinin önlenmesi için sekonder doyma gerilimi Denklem (3.8) gibi olmalıdır [15].

$$V_X > \frac{I_2}{K_n} \times (R_B + X_L + R_S) \left(1 + \frac{X}{R} \times \frac{R_S \times R_B}{Z_S} \right) \quad (3.8)$$

Şekil 2.8 'de yer alan I_{ps} akımı ölçü akım transformatörlerinde emniyet faktörü akımı, koruma akım transformatörlerinde ise hassasiyet sınır akımı olarak adlandırılır. I_{ps} akımının anma akımına oranı ise emniyet faktörü (FS) ve hassasiyet sınır aşırı akım faktörü (ALF) olarak adlandırılır. FS ve ALF tanımları aynı olsa da farklı hata sınırlarına sahiptirler. Eğer primer akımı I_{pn} 'den I_{ps} 'ye yükselirse indüklenen gerilim ve akı yaklaşık aynı oranda artacaktır. Bu ilişki Denklem 3.9 'da verilmiştir.

$$(FS)_{ALF} = \frac{I_{ps}}{I_{pn}} \approx \frac{B_s}{B_n} \quad (3.9)$$

Doyma bölgesinde uyarma eğrisi lineer kabul edilebileceğinden B_s değeri sabit ve yükten bağımsız kabul edilebilir. Fakat B_n doğrudan yük empedansı ile ilişkilidir. Buradan yola çıkarak Denklem 3.10 yazılabilir.

$$(FS)_{ALF} \approx \frac{1}{B_n} \approx \frac{1}{Z} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10 'dan yola çıkarak doyma faktörünün yüke bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Bu da farklı her yük için farklı bir doyma faktörü elde edeceğimiz anlamına gelmektedir. Eğer anma yükünde doyma faktörü verilmiş ise diğer yük değerleri için Denklem 3.11 kullanılarak farklı doyma faktörleri elde edilebilir.

$$ALF \approx ALF_n = \frac{Z_n}{Z} \quad (3.11)$$

ALF_n : Anma yükündeki doyma faktörü

Z_n : Anma yükü

Z : Hesaplanmak istenen yük değeri

3.1.3 Mıknatıslanma eğrisi

Akım transformatörünün modellenmesi ve benzetim çalışmasında, IEC 60044-1 gereği kararlı hal incelendiğinden, nüvenin histerisiz çevrimi yerine birinci bölgedeki mıknatıslanma eğrisi kullanılmıştır. Ayrıca kısa devre anında primerden geçen büyük akımlar nedeniyle sekonderdeki nüve doyuma girebileceği için uyartım eğrisinin saturasyon bölgesindeki etkisi de dikkate alınmıştır.

Genellikle transformatör tasarımında B-H çevrimi; kullanılacak ferromanyetik malzemenin cinsi belirlenirken kayıplar, ısınma, artık gerilim, azami endüksiyon bakımından dikkate alınır. Uygun çekirdek cinsi belirlendikten sonra, hesaplarda özellikle ölçü transformatörü hesabında; çevirme oranı hatası, n ve FS faktörleri bakımından B-H çevriminin birinci bölgesindeki kesikli çizgi ile gösterilen başlangıç eğrisinden yararlanılır. Ancak B ve H 'a bağımlı başlangıç eğrisi yerine nüve ve bobinin tasarım parametrelerinin (nüve kesiti, bobin sipir sayısı, bobinindeki kayıpları) etkisini de gösteren $V-I_e$ ya da $V-I_m$ mıknatıslanma eğrisi kullanılır. V , nüve üzerindeki sarımların uçlarında elde edilen gerilim, I_m nüvede mıknatıslanma için harcanan akımdır [2].

3.1.4 B-H eğrisine göre V-I_m eğrisinin elde edilmesi:

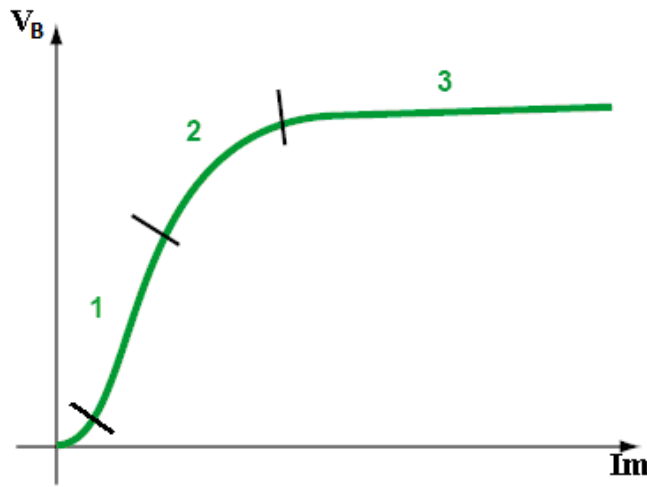
Histerisiz çevrimindeki manyetik alan yoğunluğu B değeri $e = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$ ve $\phi = B \cdot A_j$

bağıntılarıyla, nüvede indüklenen gerilim E ya da daha çok kullanılan bobin uçlarındaki gerilim V değerine dönüştürülebilir (bobindeki kayıplar nedeniyle bobin uçlarındaki gerilim, indüklenen gerilimden küçüktür). Manyetik alan şiddeti H değeri

de, amper-sarım kanunu gereği $H = \frac{N_2 \cdot I_m}{L_j}$ bağıntısı ile mıknatıslanma akımı I_m'ye

dönüştürülebilir.

Akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisi testi; primer bara açık devre iken sekonder sargı uçlarına bağlanan kaynak ile adım adım geçen akım ve buna karşılık sekonder uçlarda elde edilen gerilim ölçülerek yapılır. Akım genellikle (çevirme oranına bağlı olarak) 1A ya da 5A'e kadar artırılır, böylece anma sekonder akımında indüklenen gerilimde ölçülmüş olur. Şekil 3.6'da bölgelere ayrılmış bir mıknatıslanma eğrisi yer almaktadır.



Şekil 3.6: Mıknatıslanma eğrisinin başlıca bölgeleri

Mıknatıslanma eğrisi genel olarak 3 bölgeye ayrılabilir.

- 1) Lineer bölge (ilk kıvrılma ile ikinci kıvrım arasındaki bölge)
- 2) Diz noktası bölgesi (knee point region)
- 3) Doyum bölgesi (saturation region)

Lineer bölge; gerilim ve akım (I_m) arasındaki değişimin (yaklaşık) belirli bir orana göre seyir ettiği bölgedir. Akım transformatöründe primerden geçen akım arttıkça, sekonderin maruz kaldığı manyetik alan şiddetinin artması ve buna bağlı

olarak uyartım akımının artması ile sekonderde indüklenen gerilimin doğrusal olarak artış gösterebildiği bölgedir [8].

Diz noktası bölgesi; V - I_m arasındaki değişim oranının lineer bölgedekine oranla azalmaya başladığı ve değişimin duraksadığı noktalar arasındaki bölgedir. Kırılma (diz) noktası yaklaşık bu bölgenin ortalarında olup [1]'e göre; primer ve diğer sargılar açık devre iken, anma işletme frekansında sekondere uygulanan gerilimdeki %10'luk artışa karşılık uyartım akımındaki artışın minimum %50 olduğu bölgenin başlangıç noktasıdır.

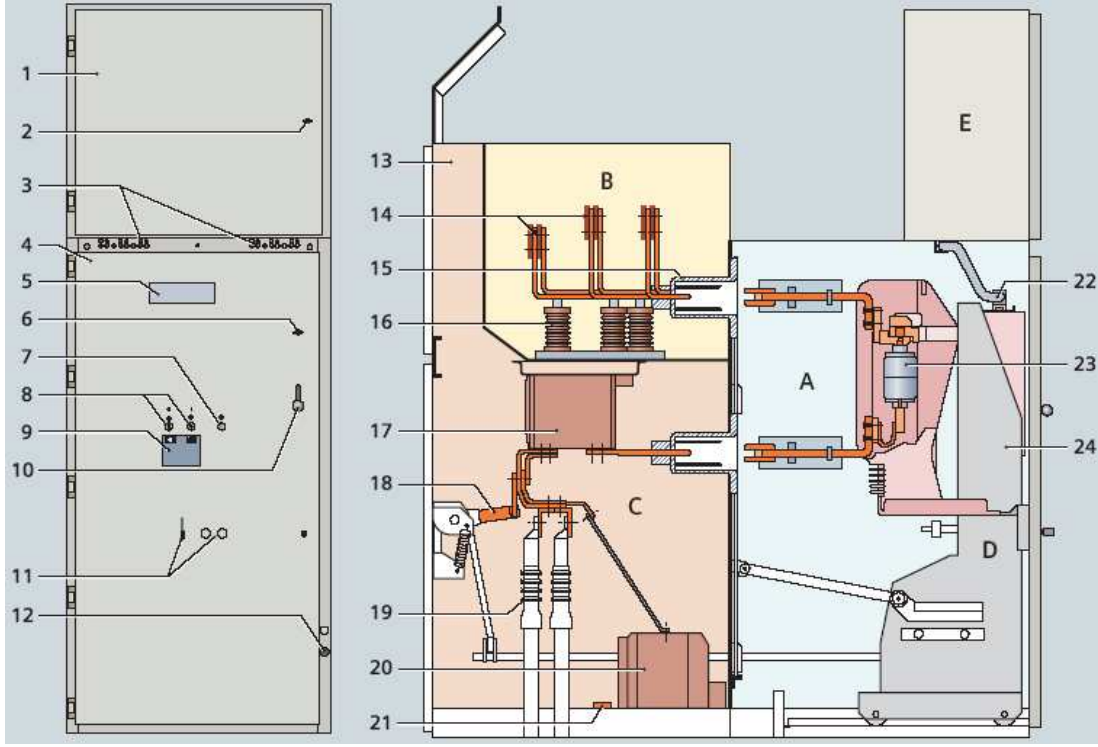
Doyum bölgesi; Mıknatıslanma akımındaki artışa karşılık gerilimde artışın neredeyse görülmediği, endüksiyonun değişmediği bölgedir. Başka bir deyişle, gerilimdeki %10'luk artışa karşılık uyartım akımının %100 artmaya başladığı noktadan sonraki bölgedir.

Ölçü akım transformatörleri genellikle, lineer bölgenin alt kısımlarında, koruma akım transformatörleri de lineer bölge ile knee point bölgesinde çalışacak şekilde tasarlanırlar.

4. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN YERLEŞİMİ

Elektrik hücre imalatçıları en ekonomik çözümü bularak maliyetleri mümkün olan en alt seviyeye çekmek için panel içi bileşenleri çok çeşitli şekilde yerleştirebilmektedir. Günümüzde halen yoğun olarak kullanılan konvansiyonel akım ve gerilim transformatörlerinin boyutsal olarak büyük ve kütle olarak da ağır olması sebebiyle panel boyutlarının küçültülmesinde sınıra yaklaşıldığı söylenebilir. Konvansiyonel akım ve gerilim transformatörlerinin boyutsal olarak büyük olması sebebiyle, panel içerisindeki elektriksel yalıtım mesafelerinin sağlanabilmesi için faz – faz arası ve faz – toprak arası mesafeler uzun tutulmakla birlikte, kütlelerinin ağır olmasından dolayı transformatörlerin bağlandığı taşıyıcı sistemler de daha sağlam tasarlanmaktadır. Bu unsurları göz önünde bulundurarak en uygun ve maliyetleri en düşük panel tasarımına ulaşmak, panel imalatçılarının en büyük hedefidir.

Bu bağlamda, daha önce bahsedilen düşük güçlü akım transformatörleri imalatçılar açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Konvansiyonel akım transformatörlerine göre boyut olarak ve kütlece çok daha küçük olan düşük güçlü akım transformatörlerinin kullanılmasıyla birlikte panellerin de boyutsal olarak küçülmesi sağlanmıştır. Konvansiyonel bir akım transformatörü 20 – 30 kg olabildiği gibi aynı görevi yerine getiren bir DGAT sadece 1 – 2 kg kadardır. Aşağıdaki şekillerde örnek olarak panel üzerinde konvansiyonel ve DGAT transformatörlerin yerleşimi gösterilmiştir. Şekil 4.1’ deki panelde konvansiyonel akım transformatörünün yerleşimi ve genel olarak panelde kullanılan elemanların yerleri belirtilmiş, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te ise düşük güçlü akım transformatörlerinin panel üzerine yerleşimi gösterilmiştir [16-18].



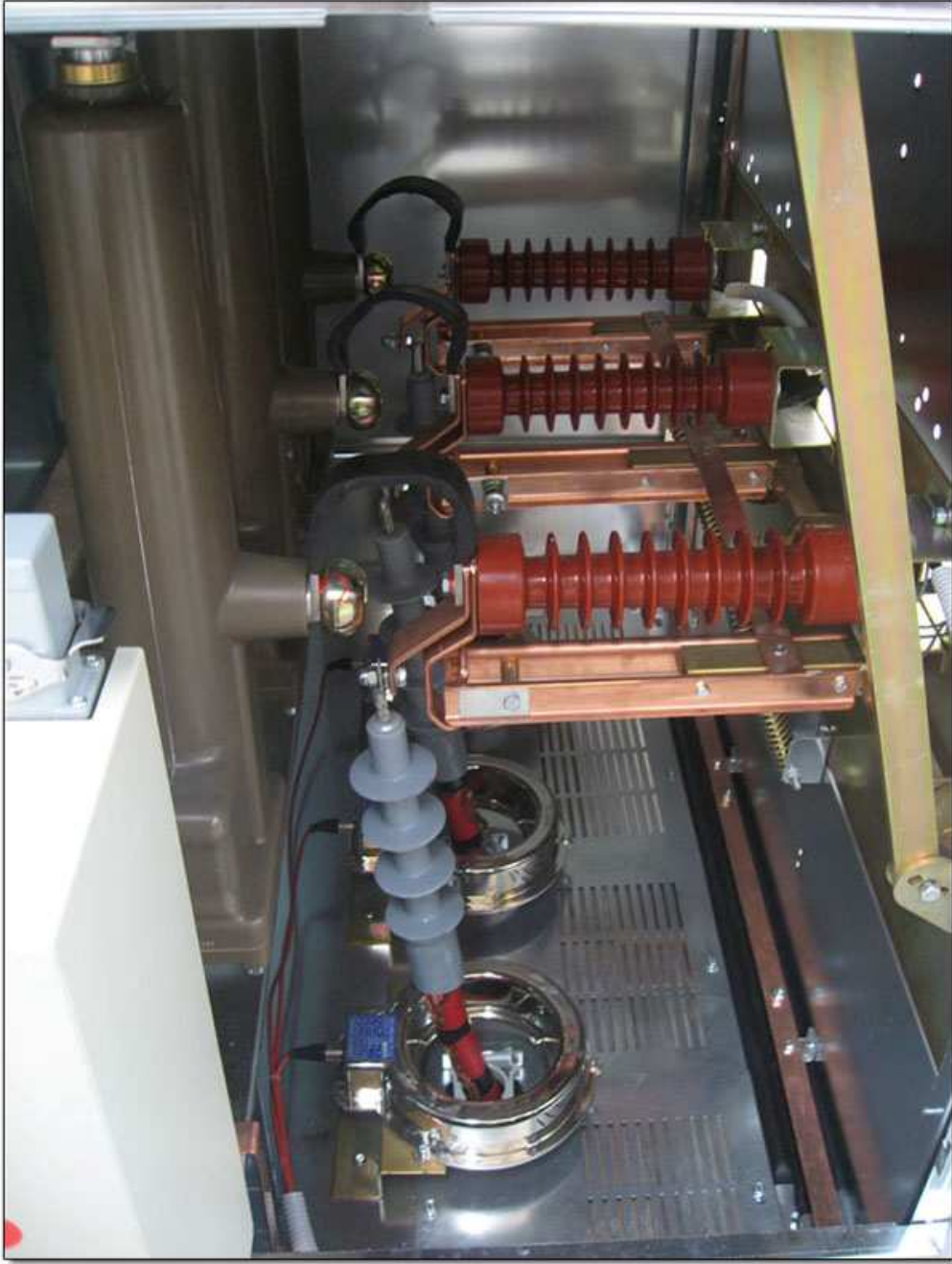
Şekil 4.1: Konvansiyonel akım transformatörlerinin kullanıldığı bir panel

- 1 = Alçak gerilim bölümü kapağı
- 2 = Alçak gerilim bölümü kapak kilidi
- 3 = Kapasitif gerilim göstergeleri
- 4 = Yüksek gerilim anahtarlama bölümü kapağı
- 5 = Cihaz durumu gözlem penceresi
- 6 = Yüksek gerilim bölümü kapak kilidi
- 7 = Kesici mekanik kurulum çıkışı
- 8 = Kesici manuel açma – kapama noktaları
- 9 = Kesici gösterge okuma penceresi
- 10 = Kapı kolu
- 11 = Anahtarlama elemanı kontrol noktası
- 12 = Topraklama anahtarı kontrol noktası
- 13 = Basınç çıkış bacası
- 14 = Busbarlar
- 15 = Bushingler
- 16 = Mesnet izolatörleri
- 17 = Akım transformatörleri
- 18 = Topraklama ayırıcısı

- 19 = Kablo başlıkları
20 = Gerilim transformatörleri
21 = Topraklama barası
22 = Alçak gerilim bağlantıları
23 = Vakum kesiciler
24 = Anahtarlama cihazı çekmecesi
A: Kesici bölmesi
B: Busbar bölmesi
C: Bağlantı bölmesi
D: Anahtarlam çekmecesi
E: Alçak gerilim bölmesi



Şekil 4.2: Düşük güçlü akım transformatörlerinin kullanıldığı bir panel



Şekil 4.3: Düşük güçlü akım transformatörlerinin yerleşimi

DGAT kullanılması ile birlikte panel boyutlarının küçülmesi, panellerdeki faz – faz ve faz – toprak mesafelerinin de azalmasına sebep olmuştur. Daha önce elektrostatik etkilerin baskın olduğu orta gerilim panellerinde mesafelerin azalmasıyla elektromanyetik etkilerde ön plana çıkmış, özellikle akım transformatörlerinin ölçme ve koruma fonksiyonlarını yerine getirmesindeki olumsuz etkileri artmıştır. Fazların birbirine yaklaşması ile birlikte fazların birbiri üzerinde yaptığı manyetik etki arttığı gibi, bir fazda bulunan akım transformatörünün çevirme oranı ve hatası diğer fazdan geçen akıma daha duyarlı hale gelmiştir. Faz akımlarının oluşturduğu manyetik alanların bileşkesi altında çalışan akım transformatörlerinin oran ve faz açısı hataları da artmıştır [19-20].

Ayrıca, düşük güçlü akım transformatörlerinin kablo sistemleri üzerin direkt olarak kullanılabilmesi ile bazı panellerde DGAT' nün kablo eksenini ile belirli bir açı yaparak montajının yapılması mümkün olmuştur. Tez konusu çalışmada, bu şekilde yapılan bağlantılarda, primerin transformatörün ortasından geçen kablo olduğu göz önüne alınırsa, primer ve sekonder sargılarının arasında geometrik olarak bir açı farkı oluştuğu fikri ortaya atılmıştır. Oluşan bu geometrik açı farkı ile primer ve sekonder sargılarının halkaladığı manyetik akının da farklı olabileceği, bunun da transformatör hata oranları üzerinde etkisi olabileceği görüşü benimsenmiştir.

Söz konusu etkileri incelemek amacıyla düşük güçlü akım transformatörleri kullanılarak tez konusu olan deney sistemi hazırlanmıştır.

5 DENEY

Bu bölümde faz akımlarının akım transformatörlerindeki ölçme hatalarına etkisinin incelendiği deney çalışması ve deney düzeneği anlatılacaktır.

5.1 Deney Yapıldığı Yer Ve Akım Transformatörlerinin Özellikleri

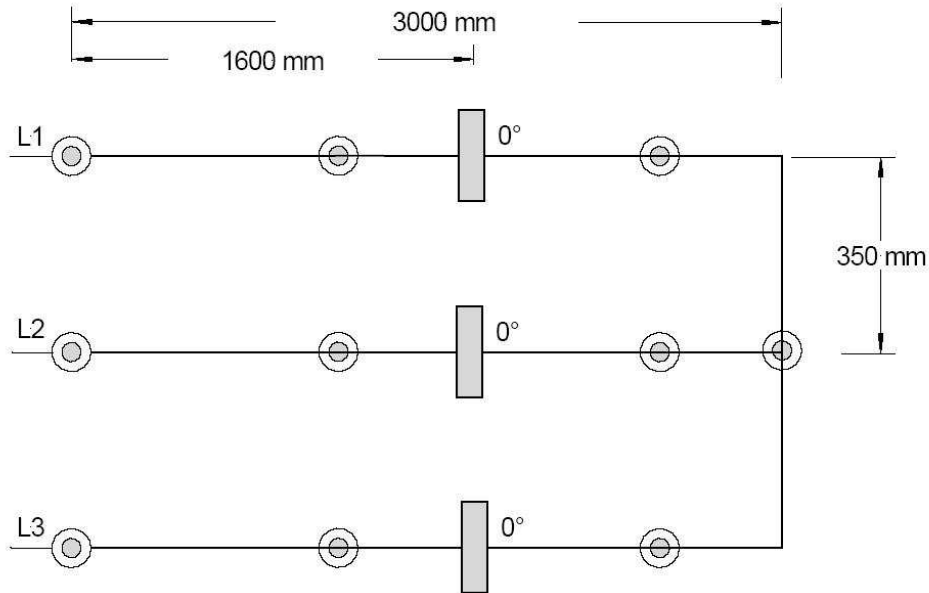
Deneyler, akım transformatörü tip testleri konusunda akredite bir laboratuvar olan ve Almanya'nın Berlin kentinde yer alan IPH Laboratuvarları Yüksek Akım Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. IPH laboratuvarları 1956 yılında Almanya'da elektrik endüstrisinin yüksek güç laboratuvarı ihtiyacını gidermek amacıyla kurulmuş ve 1988 yılında enerji sektörüne hizmet veren bağımsız bir firma olmuştur. Şu anda gerek panel gerekse akım ve gerilim transformatörü gibi panel elemanları üreticilerinin başvurduğu dünyada sayılı, gerekli tip testlerini akredite bir şekilde yapabilen bir kurumdur. Deneyde yerli bir imalatçı tarafından üretilen ve teknik özellikleri Çizelge 5.1'de verilen 3 adet düşük güçlü akım transformatörü kullanılmıştır.

Çizelge 5.1: Deneyde kullanılan akım transformatörlerinin etiket değerleri

Teknik Özellik	Transformatör Etiket Değeri
Anma İzolasyon Gerilimi	0.72 / 3 / - kV
Anma Primer Akımı	100 A
Anma Sekonder Gerilimi	22.5 mV
Anma Frekansı	50 Hz
Anma Yüğü	2 kΩ
Koruma Sınıfı	5P
Anma Kısa Devre Akımı	40 kA 1 s
Anma Dinamik Akımı	100 kA
Anma Genişletilmiş Primer Akım Faktörü	12.5
Anma Hassasiyet Sınır Aşırı Akım Faktörü	400

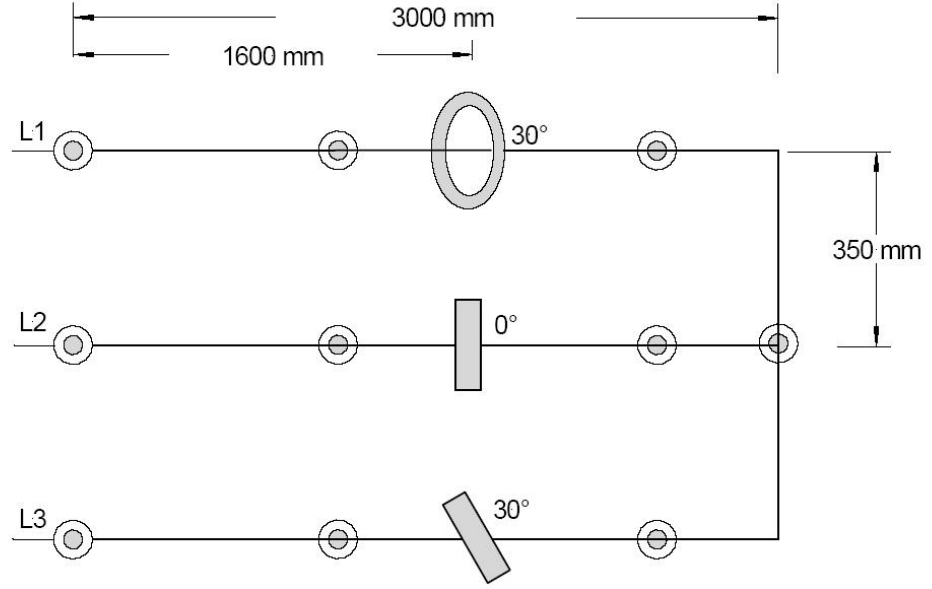
5.2 Deney Düzeneği

Deney iki aşamada gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada 3 faza bağlanan akım transformatörleri birbirlerine göre düz konumda 0° açı ile yerleştirilmiştir. Düşük güçlü akım transformatörleri merkezlerinden geçen 100×10 kesitindeki baralar ile akım kaynağına bağlanmıştır. Fazlar arasında, 36kV sistemler ile örtüşmesi açısından 350 mm aralık bırakılmıştır. Akım transformatörlerinin, sistemin yıldız noktasındaki akımdan etkilenmemesi için yıldız noktası ile akım transformatörleri arasında 1400 mm boşluk bırakılmıştır. Aynı şekilde, akım transformatörlerinin, akım kaynağındaki akımlardan etkilenmemesi için de, akım kaynağı ve transformatörler arası 1600 mm olarak ayarlanmıştır. Deney düzeneğinin ölçüsel yerleşimi ve akım transformatörlerinin pozisyonları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: 1. Deney, Transformatörlerin yerleşimi

Deneyin 2. aşamasında akım transformatörlerindeki açı farkının ölçme hatalarına etkisini incelemek için L1 fazındaki akım transformatörü yatay ile 30° , dikeyde 0° açı yapacak şekilde, L2 fazındaki akım transformatörü, yatayda ve dikeyde 0° açı yapacak şekilde, L3 fazındaki akım transformatörü ise yatayda 0° , dikeyde 30° geometrik açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. 2. aşamada transformatörlerin pozisyonları Şekil 5,2’de verilmiştir. Fazlar arası ve transformatörlerin yerleşimi ile ilgili ölçüler 1. deneydeki ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5.2: 2. Deney, Transformatörlerin yerleşimi

1. ve 2. Deney için hazırlanan deney düzeneğine ait fotoğraflar Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Akım Transformatörlerinin fazlara bağlanması



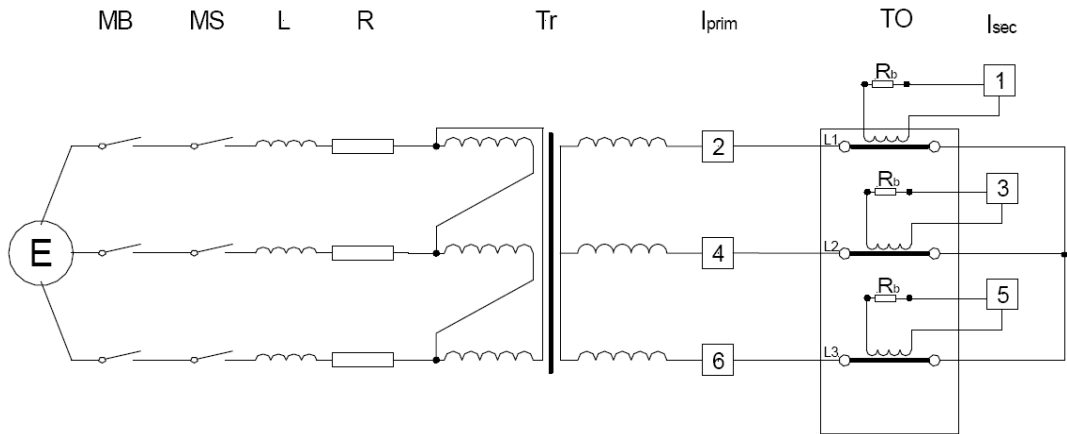
Şekil 5.4: 1. Deney – Akım Transformatörlerinin Açısız Bağlanması



Şekil 5.5: 2. Deney – Akım Transformatörlerinin Açılı Bağlanması

5.3 Deney Ve Ölçme Devreleri

Hazırlanan deney düzeneğinde, akım kaynağı olarak, laboratuarda bulunan yüksek akım transformatörü kullanılmıştır. Gerekli akım seviyesinin ayarlanabilmesi için bu transformatörün ayar kademesi değiştirilmiş, endüktans bobinleri ve dirençler devreye eklenip çıkartılarak istenen akımın transformatörlerden geçmesi sağlanmıştır. Akım transformatörlerinin çıkışlarındaki mili volt seviyesindeki çıkış gerilim bilgileri, bu bilgileri kaydedebilecek cihazlara bağlanarak deney süresince kayıt alınmıştır. Aynı şekilde, primer akımları kalibre şönt dirençler üzerinden akıtılarak aynı cihazlarda deney süresince kayıt altına alınmıştır. Kayıt cihazları ise doğrudan bilgisayarlara bağlanmış olup, deney sonrasında kayıtlar bilgisayara aktarılıp gerekli hesaplama işlemleri bilgisayar aracılığı ile yapılmıştır. Şekil 5.6'da deney düzeneğinin elektriksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.6: Deney Düzeneğinin Elektriksel Gösterimi

Şekil 5.6'da verilen devreye ait elemanların açıklamaları Çizelge 5.2'de, ölçüm noktaları ve ölçülen değerlerin açıklamaları ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2: Deney Düzeneği Elektriksel Gösterimine Ait Açıklamalar

Simge	Açıklama
E	Güç kaynağı
MB	Ana kesici
MS	Güvenlik anahtarı
L	Akım sınırlayıcı reaktör
R_b	2 k Ω anma yükü
2,4,6	Primer akım ölçüm noktaları
1,3,5	Sekonder gerilim ölçüm noktaları
Tr	Kısa devre transformatörü
TO	Deney nesnesi
R	Akım sınırlayıcı direnç

Çizelge 5.3: Deney Düzeneği Ölçüm Noktaları Ve Ölçülen Değerler

Ölçüm Noktası	Sembol	Ölçülen Birim	Ölçme Cihazı
2	iL1	L1 Primer Akımı	Kalibre Şönt Direnç
4	iL2	L2 Primer Akımı	Kalibre Şönt Direnç
6	iL3	L3 Primer Akımı	Kalibre Şönt Direnç
1	uL1	L1 Sekonder Gerilimi	Doğrudan
3	uL2	L2 Sekonder Gerilimi	Doğrudan
5	uL3	L3 Sekonder Gerilimi	Doğrudan

5.3 Deneyin Yapılışı

Yapılan 1. deneyde, transformatörler belirtilen geometrik pozisyonlarda iken, farklı akım seviyeleri 1 saniye süreyle uygulanıp, primer akımları ve sekonder gerilimleri kaydedilmiştir. Aynı şekilde, 2 deney için de, transformatörlerin geometrik yerleşimleri düzenlenmiş ve aynı akım kademelerinde 1 saniye süreyle akım verilip primer akımları ve sekonder gerilimleri kaydedilmiştir. Uygulanan akım kademeleri; 100A, 200A, 300A, 400A, 500A, 750A, 1000A, 1250A, 1500A, 2000A, 2500A, 5000A, 7500A, 10000A, 12500A, 15000A, 17500A, 20000A, 25000A, 30000A ve 40000A olarak seçilmiştir. Seçilen akım kademelerinin yardımıyla, akım transformatörlerinin etiket değerleri olan 1250A ölçme sınıfı ve 40kA koruma sınıflarını sağlayıp sağlamadığı ya da hangi akım değerlerine kadar bu sınıfları sağladığının görülmesi amaçlanmıştır. Deney sonucunda, verilen her akım kademesi için hem primer akımları hem de sekonder gerilim dalga şekilleri kaydedilmiştir. İstenilen akımın tam değerini ayarlamak sistem olarak mümkün olmadığı için, istenilen akım değerine yakın olan akım değerleri kabul edilmiştir.

5.4 Deney Sonuçları

Yapılan deneylerde elde edilen ölçümler bilgisayar yardımıyla derlenmiştir. Yapılan derlemede, Denklem 5.1 yardımıyla çevirme oranı 4444,444 olarak bulunarak ölçülen sekonder gerilimleri primer akımları seviyesine indirgenmiş ve elde edilen grafikler yardımıyla çevirme oranı hatası, faz açısı hatası ve bileşik hata oranları elde edilmiştir.

$$\frac{100A}{0.0225V} = 4444,444 \quad (5.1)$$

1. deney sonucunda elde edilen ölçümler Çizelge 5.4'te, hesaplanan hata değerleri ise Çizelge 5.5'te verilmiştir. Çizelgelerden de görülebileceği üzere, yapılan 7 numaralı teste istenilen 1000A değerine yaklaşılamadığı için 8 numaralı testte aynı akım seviyesi verilmiştir. Ayrıca test sonrasında 7500A olarak yapılan teste veri kaybı olduğu tespit edilip yapılan değerlendirmede ele alınmamıştır. 8 numaralı teste yapılan 10000A denemesi, aynı şartlar altında tekrar edilerek, aynı çıktıları verip

vermediği kontrol edilmiş, ve ölçüm sisteminde herhangi bir tutarsızlık olmadığı kontrol edilmiştir.

Çizelge 5.4: 1. Deney Sonucu Ölçüm Değerleri

Test No.	Referans Primer Akım Ölçümü			Akım Tr.Sekonder Çıkış Gerilimleri		
	A			mV		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	103.7	105.1	103.4	0.0233	0.0237	0.0233
2	201.9	202.0	200.8	0.0454	0.0455	0.0452
3	301.3	295.9	291.8	0.0677	0.0666	0.0657
4	401.3	398.1	390.6	0.0902	0.0896	0.0880
5	529.3	512.8	513.2	0.1190	0.1155	0.1156
6	783.1	795.3	771.2	0.1761	0.1791	0.1737
7	897.8	908.7	905.3	0.2019	0.2046	0.2039
8	1108.4	1078.8	1071.3	0.2492	0.2428	0.2412
9	1255.0	1238.4	1239.9	0.2821	0.2787	0.2791
10	1576.4	1538.5	1562.2	0.3546	0.460	0.3516
11	2065.0	2025.1	2065.4	0.4644	0.4554	0.4649
12	2543.6	2482.1	2556.6	0.5720	0.5580	0.5756
13	5537.2	5584.8	5572.0	1.2473	1.2592	1.2555
14	10677.6	10817.8	10783.4	2.4041	2.4450	2.4292
15	10572.9	10710.1	10670.5	2.3815	2.4217	2.4042
16	12197.1	12400.8	12342.6	2.7471	2.8061	2.7811
17	15227.9	15550.0	15424.8	3.4308	3.5164	3.4763
18	17315.6	17670.5	17350.3	3.9015	3.9943	3.9137
19	21407.8	22117.7	21947.7	4.8239	5.0045	4.9299
20	24341.9	25086.0	24372.5	5.4861	5.6692	5.4550
21	28657.3	29783.3	28738.8	6.4939	6.7312	6.3823
22	40835.6	43139.8	40715.4	9.3067	9.9382	8.8954

Çizelge 5.5: 1. Deney Sonucu Hesaplanan Hata Değerleri

Test No.	Çevirme Oranı Hatası			Faz Açısı Hatası			Bileşik Hata		
	%			Dakika			%		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	-0.07	0.01	-0.03	4.38	2.50	8.23	0.5	0.9	1.2
2	-0.08	0.02	0.01	2.03	2.91	6.87	0.3	0.4	0.5
3	-0.08	0.07	0.07	1.45	2.30	6.10	0.3	0.2	0.5
4	-0.08	0.10	0.11	1.40	1.95	6.04	0.2	0.3	0.5
5	-0.04	0.10	0.13	1.02	2.38	5.67	0.2	0.3	0.4
6	-0.04	0.08	0.09	0.77	1.97	5.67	0.2	0.2	0.4
7	-0.05	0.06	0.09	0.62	1.51	5.67	0.1	0.3	0.3
8	-0.09	0.02	0.04	0.67	1.81	5.53	0.2	0.2	0.3
9	-0.09	0.02	0.05	0.68	1.43	5.34	0.2	0.3	0.3
10	-0.03	-0.04	0.03	2.23	0.23	5.48	0.5	0.9	1.2
11	-0.04	-0.06	0.05	1.37	0.97	4.96	0.4	0.6	0.9
12	-0.05	-0.09	0.06	1.69	-0.49	4.46	0.3	0.5	0.7
13	0.11	0.21	0.14	11.40	7.23	0.62	1.7	0.9	0.8
14	0.07	0.45	0.12	10.89	11.95	3.51	0.9	0.7	0.4
15	0.11	0.49	0.14	10.77	11.84	2.90	0.5	0.7	0.4
16	0.10	0.57	0.15	10.24	31.04	4.65	0.5	0.9	0.4
17	0.13	0.50	0.17	15.40	158.10	6.84	0.5	3.0	0.4
18	0.14	0.46	0.25	11.91	247.92	6.14	0.4	4.9	0.4
19	0.15	0.56	-0.17	11.65	406.89	31.28	0.4	9.1	1.3
20	0.17	0.44	-0.53	12.7	504.7	71.9	0.6	11.55	2.4
21	0.71	0.45	-1.30	31.8	638.2	140.4	1.8	15.1	4.2
22	1.29	2.39	-2.90	342.4	1108.8	352.0	9.2	27.3	9.3

Çizelge 5.6’da 2. deney sonucunda elde edilen ölçüm değerleri, Çizelge 5.7’de ise 2. deney sonucunda hesaplanan hata değerleri verilmiştir. 29 numaralı testte istenilen 1000A test akımı elde edilememiş ve test aynı akım seviyesinde iki kez tekrar edilmiştir.

Çizelge 5.6: 2. Deney Sonucu Ölçüm Değerleri

Test No.	Referans Primer Akım Ölçümü			Akım Tr. Sekonder Çıkış Gerilimleri		
	A			mV		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
23	98.5	103.2	101.8	22.161	23.223	22.895
24	199.1	207.4	214.1	44.772	46.685	48.189
25	320.5	329.6	323.8	72.0161	74.220	72.918
26	401.4	405.7	398.1	90.225	91.383	89.655
27	518.9	524.0	512.7	116.691	118.063	115.487
28	751.9	707.5	734.3	169.05	159.286	165.336
29	836.08	770.73	821.67	187.971	173.497	184.959
30	973.05	915.40	959.26	218.753	205.993	215.923
31	1035.06	1016.49	989.70	232.682	228.766	222.757
32	1192.31	1176.79	1097.30	268.013	264.863	246.952
33	1391.0	1396.0	1285.5	312.914	314.219	289.418
34	1577.7	1539.7	1564.3	354.871	346.278	352.050
35	2052.9	1988.6	2056.8	461.674	447.156	462.948
36	2532.8	2447.7	2548.3	569.570	550.282	573.660
37	5516.7	5549.9	5541.2	1.2418	1.2540	1.2486
38	7683.7	7761.1	7225.1	1.7296	1.7530	1.7402
39	10610.4	10748.7	10697.9	2.3886	2.4793	2.4116
40	12181.5	12398.8	12336.1	2.7443	2.8054	2.7801
41	14546.7	14843.5	14743.3	3.2777	3.3808	3.3217
42	17218.0	17678.8	17566.0	3.8793	4.0526	3.9218
43	19780.3	20383.3	20236.9	4.4544	4.6424	4.4977
44	24295.5	25049.7	24300.6	5.4827	5.7198	5.3195
45	28615.8	29728.6	28647.6	6.4782	6.7455	6.1845
46	40731.9	43060.4	40664.8	9.0298	9.8589	8.5058

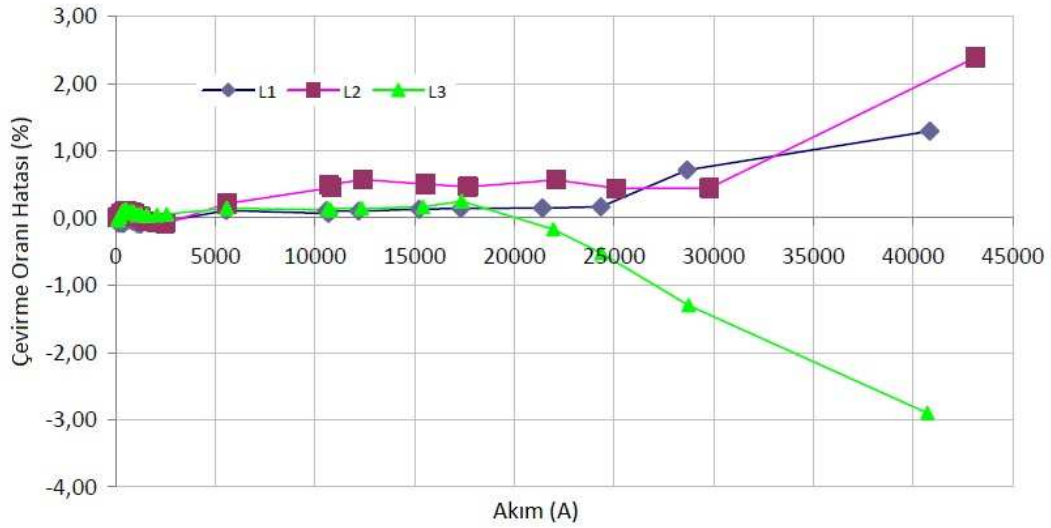
Çizelge 5.7: 2. Deney Sonucu Hesaplanan Hata Değerleri

Test No.	Çevirme Oranı Hatası			Faz Açısı Hatası			Bileşik Hata		
	%			Dakika			%		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
23	-0.05	0.02	-0.02	4.05	2.90	8.10	0.5	0.8	1.0
24	-0.07	0.02	0.02	1.55	1.84	6.78	0.3	0.3	0.5
25	-0.08	0.08	0.08	1.04	1.80	6.42	0.2	0.2	0.3
26	-0.09	0.12	0.09	0.81	1.82	6.32	0.2	0.2	0.4
27	-0.04	0.13	0.11	0.57	2.13	5.94	0.1	0.2	0.3
28	-0.05	0.06	0.08	-0.17	2.34	5.11	0.2	0.2	0.3
29	-0.08	0.05	0.04	0.57	2.27	5.08	0.2	0.2	0.2
30	-0.08	0.01	0.04	0.18	2.01	5.05	0.3	0.1	0.3
31	-0.09	0.02	0.03	0.20	2.11	5.29	0.2	0.1	0.2
32	-0.10	0.03	0.02	0.04	2.16	5.28	0.1	0.1	0.2
33	-0.02	0.04	0.06	1.87	1.18	5.37	0.5	0.9	1.4
34	-0.03	-0.05	0.02	1.41	0.77	5.30	0.5	0.9	1.1
35	-0.05	-0.06	0.04	0.74	0.40	4.91	0.4	0.6	1.0
36	-0.06	-0.08	0.05	-0.15	-0.51	5.22	0.3	0.5	0.8
37	0.05	0.42	0.15	10.21	11.17	4.58	0.3	0.6	0.5
38	0.04	0.39	0.12	9.80	14.83	4.77	0.3	0.6	0.4
39	0.05	0.45	0.19	9.26	19.97	4.23	0.3	0.7	0.3
40	0.13	0.56	0.16	10.61	23.36	3.18	0.4	0.8	0.4
41	0.14	1.21	0.13	14.27	101.42	3.50	0.5	3.0	0.5
42	0.13	1.88	-0.77	16.62	211.76	5.47	0.5	6.5	1.8
43	0.09	1.22	-1.22	11.53	330.20	6.19	1.6	7.1	6.3
44	0.30	1.48	-2.71	14.49	491.32	49.01	1.1	11.5	4.9
45	0.62	0.85	-4.05	42.80	632.60	117.41	2.8	15.1	6.8
46	-1.47	1.76	-7.04	250.49	1067.49	321.03	14.6	28.3	11.7

6 DENEY SONUÇLARI

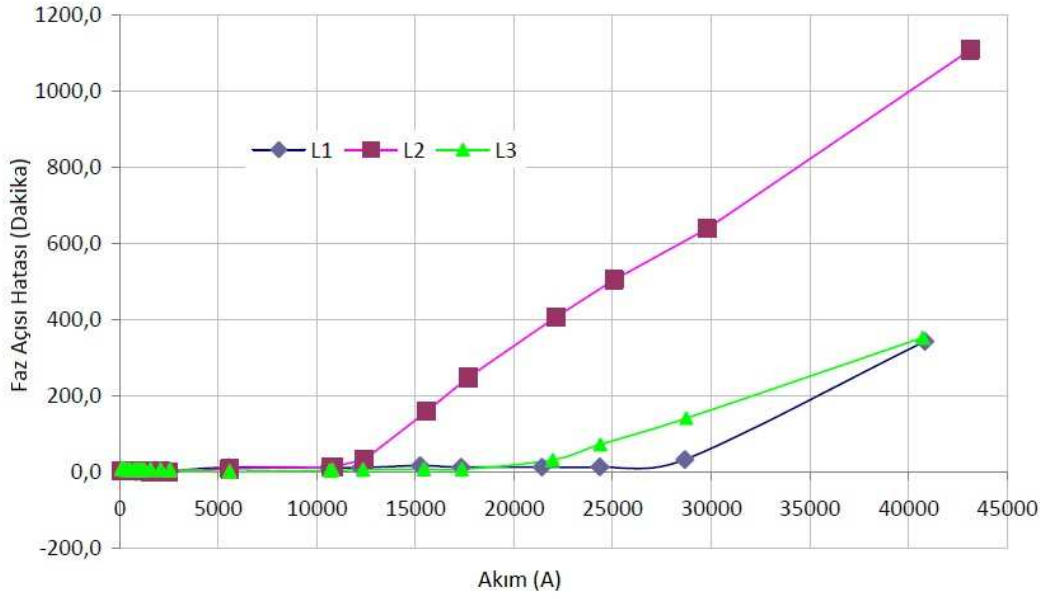
6.1 Aynı Düzlemdeki Akım Transformatörlerinde Hata Değerleri

Yapılan ilk deneyde elde edilen sonuçlar 5. Bölümde verilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'teki akıma bağlı hata değerlerinin değişimi verilmiştir. Şekil 6.1'de aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde çevirme oranı hatasının akım değeri ile değişimine ait grafik verilmiştir.



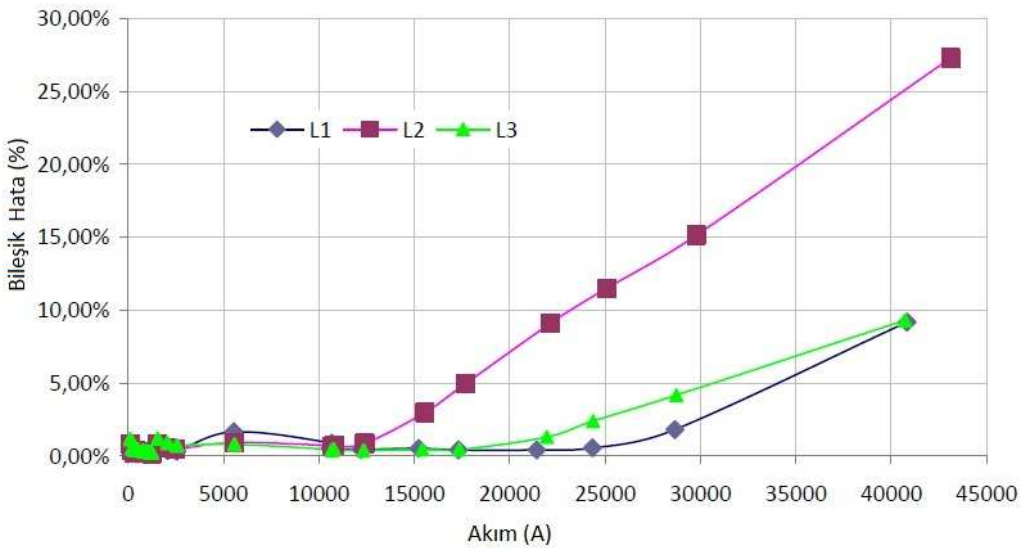
Şekil 6.1: Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde çevirme oranı hatası

Verilen grafikten de anlaşılacağı gibi kullanılan akım transformatörleri özdeş olmalarına rağmen yaklaşık 20kA'den sonra farklı fazlarda bulunan akım transformatörlerinin hata değerleri de değişkenlik göstermektedir. L3 fazında 20kA'den sonra çevirme oranı hatası hızlı bir şekilde düşerek 40kA'de %-3'e yaklaşmaktadır. L1 fazı incelendiğinde, 25kA'e kadar yaklaşık olarak sabit seyreden hata değeri, bu akım değerinden sonra hızla artmaktadır. L2 fazında ise 30kA'e kadar %0,5 civarında olan çevirme oranı hatası 40kA akımda %2,5 değerine çıkarak yaklaşık 5 kat artmaktadır.



Şekil 6.2: Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde faz açısı hatası

Yukarıda yer alan Şekil 6,2’de aynı düzlemde yer alan akım transformatörlerinde akım ile faz açısı hatasının değişimi gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği üzere yaklaşık 12.5kA’den sonra L2 fazındaki akım transformatörünün açısı hatası hızlı bir şekilde artarak 40kA’de 1000 dakikaya kadar çıkmaktadır. Deney düzeneğinde yanlarda yer alan L1 ve L3 fazlarında yer alan akım transformatörlerinin faz açısı hataları yaklaşık olarak paralel seyretmekte, 25kA civarında artışa geçerek 40kA’de yaklaşık 300 dakikaya çıkmaktadır.



Şekil 6.3: Aynı düzlemdeki akım transformatörlerinde bileşik hata

Şekil 6.3'te üç fazlı olarak test edilen akım transformatörlerinde akım ile bileşik hatanın değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.2'de verilen faz açısı hatalarına göre benzerlik gösteren bileşik hata eğrilerinde L1 ve L3 fazlarında yer alan transformatörlerin bileşik hataları yaklaşık 25kA seviyesinden sonra hızla artarak 40kA'de %10'a yaklaşmaktadır. Aynı şekilde L2 fazındaki transformatörde ise, bileşik hata 12.5kA değerinden sonra hızla artarak 40kA seviyesinde %25'e ulaşmaktadır.

6.2 1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bölüm 6.1'de verilen grafiklerin incelenmesi sonucunda, tez konusu üç fazlı sistemlerde akım transformatörleri hata değerlerinin komşu faz akımlarından etkilendiği çıkarımının yapılması yanlış olmayacaktır. Deneyde kullanılan akım transformatörlerinin etiket değerleri aynı olduğundan, aynı faz akımlarına karşılık yaklaşık hata değerleri vermeleri gerekirken, özellikle yüksek akımlarda hata değerlerinde bariz farklılıklar oluştuğu gözlemlenmiştir.

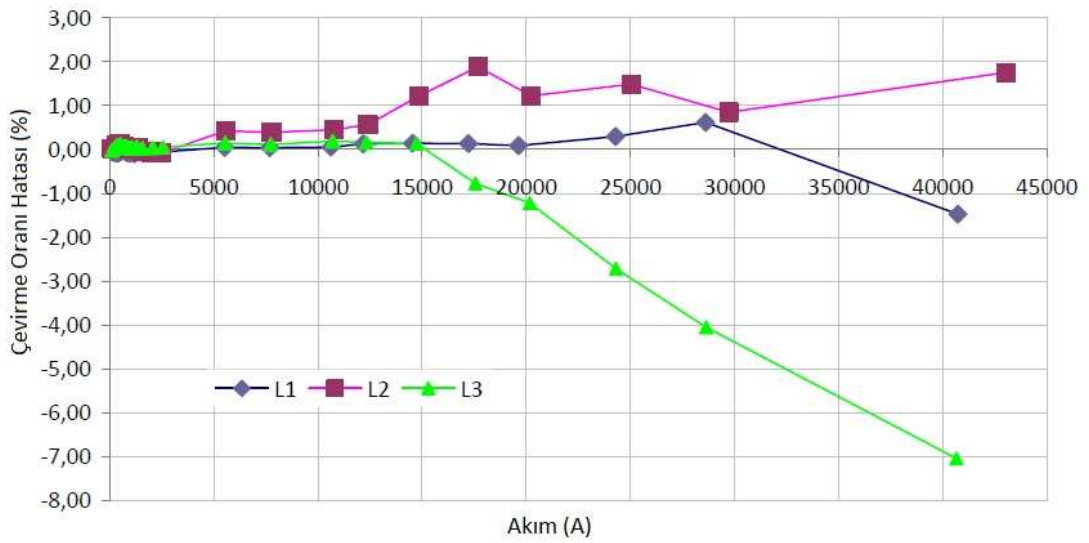
Kullanılan akım transformatörlerinin ölçme sınıfı 0.5, genişletilmiş anma primer akımı ise 1250A'dir. Bunun sebebi, kullanılan akım transformatörlerinin her birinin 1250A'e kadar 0.5 sınıf hata değerleri olan, %0.5 çevirme oranı hatası ve 60 dakika faz açısı hatasını aşmamasını beklenir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 incelendiğinde bu değerlerin 1250A'de her üç fazdaki akım transformatörleri tarafından da sağlandığı görülmektedir. Hatta bu sınır değerler, üç faz için de 12500A'e kadar sağlanabilmektedir. Fakat bu akım değerinden sonra fazlar arasında farklılık oluşmaktadır. Çevirme oranı hatası bakımından 12500A değerinden sonra L3 fazındaki hata hızlı bir biçimde düşerken L1 ve L2 fazlarındaki hata artmaya başlamaktadır. Bundan farklı olarak, 12500A'den sonra L2 fazındaki faz açısı hatası çok hızlı bir şekilde artarken, L1 ve L3 fazlarının faz açısı hatası 25kA' kadar sabit kalmakta ve bu değerden sonra artmaya başlamaktadır.

Bileşik hata değerlerinin gösterildiği Şekil 6.3 incelendiğinde ise, orta faz olan L2 fazı için bileşik hata değerinin 12500A'den sonra hızlı bir şekilde arttığı, L1 ve L3 fazlarında ise 25kA'e kadar yaklaşık sabit kalarak, bu değerden sonra artmaya başladığı görülebilmektedir. Kullanılan akım transformatörleri koruma sınıfı 5P olarak verilmiş, anma hassasiyet sınır aşırı akım faktörü ise 400 olduğu etiketlerinde belirtilmiştir. 5P koruma sınıfının tanımına göre transformatörler, 100A anma akımlarının 400 katı olan 40kA akımda %5 bileşik hata sınırını aşmamak zorundadır. İlgili grafik incelendiğinde, L1 fazı için yaklaşık 34kA'de, L2 fazı için 17.5kA'de ve L3 fazı için 30kA'de %5 bileşik hata sınırının aşıldığı görülür. Etiket değerlerinde 40kA'e kadar %5 bileşik hata sınırını sağlaması gereken transformatörler, üç faz olarak yapılan testte bu şartı sağlayamamaktadır. Orta faz olan L2 fazındaki transformatör, yan fazlar olan L1 ve L3 fazlarındakilere oranla çok daha önce hata sınırını aşmaktadır. Akım transformatörleri bölümünde anlatılan hata hesaplamaları ve manyetik doyma ile ilgili bilgiler göz önüne alındığında, akım transformatörlerinde doyma meydana geldiği görülebilir. 3 fazlı sistemde, faz akımlarının oluşturduğu bileşke manyetik alan, akım transformatörlerinin nüvelerinde doyuma sebep oluşturmaktadır. Orta faz olan L2 fazında bileşke manyetik alan diğer L1 ve L3 fazlarına göre daha fazla olmakta, bu da L2 fazındaki akım transformatörünün daha önce doyuma girerek hata sınırı dışına çıkmasına sebep olmaktadır. Daha önce verilen bilgiler değerlendirildiğinde akım transformatörlerinde faz açısı hatasının artmasının sebebinin manyetik nüvenin doyuma girmesi olduğu söylenebilir. Faz açısı hatası ve bileşik hata grafikleri incelendiğinde, bu iki grafiğin birbirine paralellik gösterdiği görülmektedir. Akım transformatörleri nüvelerinde oluşan doyma, faz açısı hatasını arttırmakta, bu da bileşik hata oranlarının artarak sınır dışına çıkmasına sebep olmaktadır.

1. deney sonucunda elde edilen sekonder gerilimlerinin primer akım değerlerine yükseltilmesi ve fark değerinin alınarak bileşik hata grafiğinin çıkartılmasına ait grafiksel veriler EK A.1'de verilmiştir. Grafiklerde mavi eğriler primer akımı, kırmızı eğriler sekonder akımı ve siyah eğriler ise farkı akımını göstermektedir.

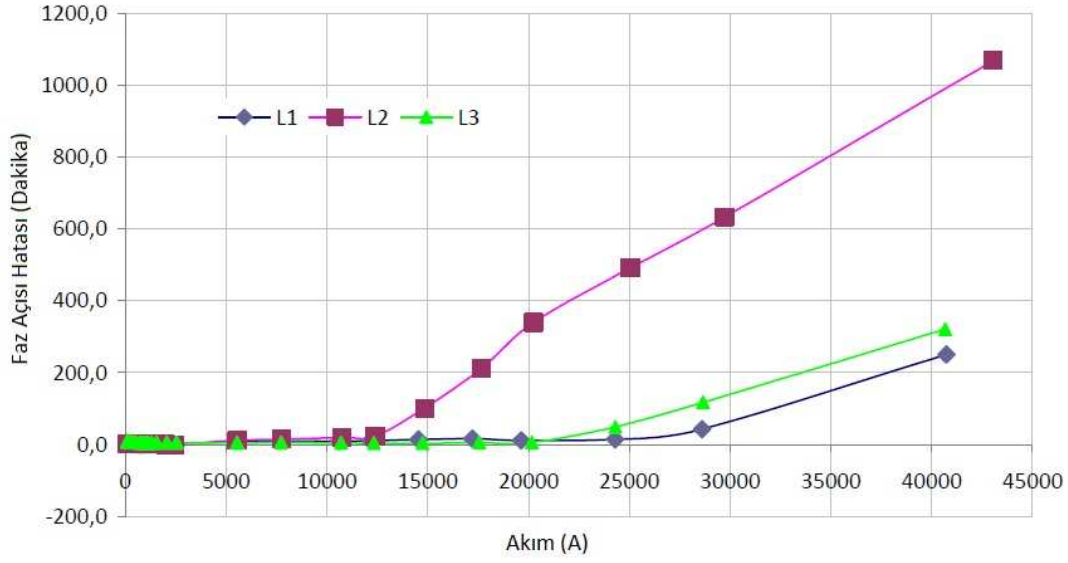
6.3 Farklı Düzlemdeki Akım Transformatörlerinde Hata Değerleri

Tezin ikinci aşaması olarak, farklı düzlemlerde yerleştirilen toroidal akım transformatörlerinin hata değerlerinin değişimi incelenmiştir. L1 fazında yer alan transformatör yatay ile 30° , L2 fazı yatay ve dikey eksene 0° , L3 fazı ise dikey eksene 30° açıyla yerleştirilerek verilen akım değerlerinde hata değerleri kayıt altına alınmıştır. Şekil 6.4'te anlatılan şekilde monte edilen akım transformatörlerine ait, çevirme oranı hatasının akım ile değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



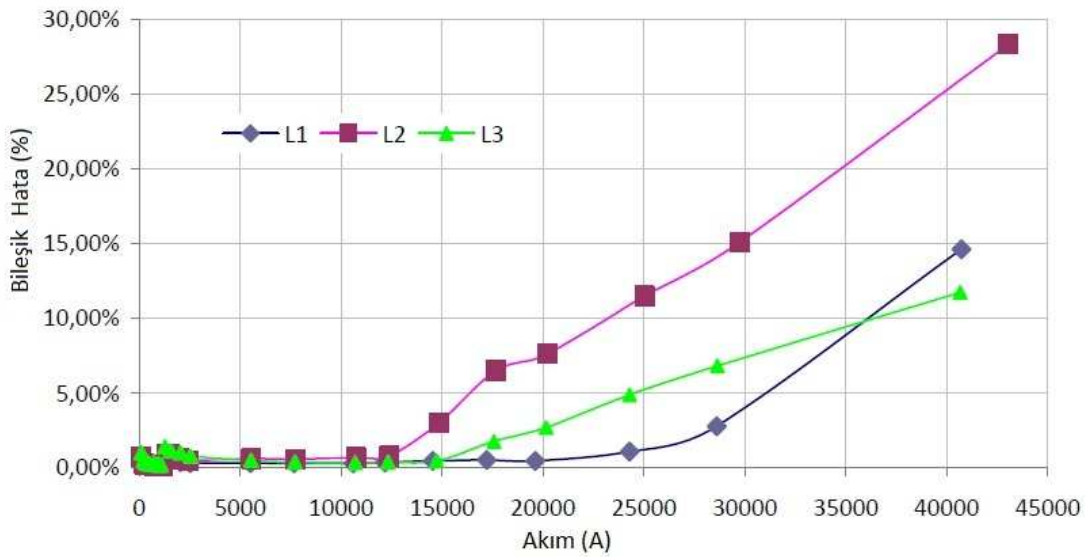
Şekil 6.4: Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde çevirme oranı hatası

Verilen grafik incelendiğinde, L1 fazındaki akım transformatörüne ait çevirme oranı hatasının 5kA seviyesinde hafif bir artma gösterdiği, 12,5kA seviyesinden sonra ise tekrar artan ve azalan bir dalgalanma gösterdiği görülmektedir. L2 fazındaki artma 20kA seviyesinden sonra başlamakta ve 30kA seviyelerinde düşüşe geçmektedir. L3 fazında ise, çevirme oranı hatası 15kA'den sonra hızlı bir düşüş göstererek 40kA'de %-7 seviyelerine gelmektedir.



Şekil 6.5: Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde faz açısı hatası

Şekil 6.5'te farklı düzlemde yer alan akım transformatörlerinin faz açısı hatasının akım ile değişimi verilmiştir. Grafikten de görülebileceği üzere yatayda 30° ve dikeyde 30° açıyla yerleştirilen L1 ve L3 fazlarındaki akım transformatörlerinin faz açısı hata değerleri yaklaşık paralel gitmekte, 25kA değerinden yükselişe geçmektedir. Her iki faz içinde 40kA akım değerinde faz açısı hata değerleri 250 dakika civarına çıkmaktadır. Ortada bulunan ve yatayda ve dikeyde 0° açıyla monte edilmiş olan L2 fazında ise, faz açısı hata değeri 12.5kA değerine kadar sabit kalmakta, bu değerden sonra ise hızla artarak 40kA'de 1100 dakikaya ulaşmaktadır.



Şekil 6.6: Farklı düzlemdeki akım transformatörlerinde bileşik hata

Şekil 6.5 ile verilen bileşik hata değişimleri incelendiğinde, L1 fazına ait bileşik hata değerinin 25kA'e kadar sabit kaldığı bu noktadan sonra ise yükselerek 40kA'de yaklaşık %15'e çıktığı görülmektedir. L2 fazı ise 12.5kA'den sonra hızla artmakta ve 40kA'de %25'e çıkmaktadır. L3 fazında yer alan ve dikey ile 30° açı ile yerleştirilmiş akım transformatörünün bileşik hata oranı 15kA'e kadar sabit kalmakta, bu değerden sonra yükselerek 40kA'de yaklaşık %12 değerine çıkmaktadır.

6.4 2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

1. deney sonucunda farklı fazlarda yer alan akım transformatörlerinin hata değerlerinin komşu faz akımlarından etkilenmesi incelenmiştir. Gerçekleştirilen 2. deney ile akım transformatörlerinin pozisyonlarının hata değerlerine olan etkisi incelenmiş olup, sonuçlar bölüm 6.3'te verilmiştir. İlgili bölümde verilen grafikler incelendiğinde L1, L2 ve L3 fazlarındaki hata oranları değişiminin, 1. deneyde alınan sonuçlara çok yakın olduğu görülebilir.

1. deneyde çevirme oranı hatası için, L1 fazı yaklaşık 25kA'den sonra artışa geçmekte, aynı şekilde 2. deneyde de 25kA'den sonra hata değeri artmaktadır. L2 fazı için her iki deneyde de birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Dikeyde 30° açıyla yerleştirilen L3 fazındaki akım transformatöründe ise, ilk deneyde 20kA'den sonra düşüşe geçen hata değeri, ikinci deneyde yaklaşık 15kA'den sonra düşmeye başlamıştır.

Faz açısı hata oranları her iki deney için de incelendiğinde, küçük sapmalar ele alınmadığı takdirde hemen hemen aynı akım seviyelerinde hata değerleri artmaya başlamıştır. İlgili grafiklerde görüleceği üzere, üç faz içinde faz açısı hata değeri grafiklerinin birebir örtüştüğü görülmektedir. Açılı yerleştirilen L1 Ve L3 fazlarındaki akım transformatörleri iki deneyde de 22-23kA seviyesinden sonra artışa geçerken, L2 fazı için bu değer her iki deneyde de 12.5kA seviyesindedir.

Çevirme oranı ve faz açısı hatası değerlerinde her iki deney için yaklaşık olarak örtüşen değerler, bileşik hata değerleri için de örtüşmektedir. L1 ve L3 fazları için 15-17kA seviyesinde başlayan bileşik hata oranı artımı, L2 fazı için her iki deneyde de 12.5kA seviyesinde başlamakta ve 40kA'de yaklaşık %25-27 seviyesine gelmektedir.

Yapılan 2. deney sonuçlarının ilk deney ile karşılaştırılması ile yatay ve dikey ekseninde açılı yerleştirilmeleri durumunda, akım transformatörlerinde hata değerlerini etkileyecek önemli bir değişiklik olmadığı sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen iki deneyde de çevirme oranı hatası, faz açısı hatası ve bileşik hata değerleri bütün fazlar için örtüşmüştür. Yapılan çalışma sonuçlarına dayanarak, toroidal tip akım transformatörlerinin, kullanıldığı panellerde 30°'ye kadar farklı açılar ile yerleştirilmesinin ölçme ve koruma fonksiyonları açısından bir sıkıntı oluşturmayacağı sonucuna varılmıştır. Akım transformatörleri, deney şartlarındaki pozisyonları ile etiket değerlerini sağlamışlardır.

2. deney sonucunda elde edilen sekonder gerilimlerinin primer akım değerlerine yükseltilmesi ve fark değerinin alınarak bileşik hata grafiğinin çıkartılmasına ait grafiksel veriler EK A.2'de verilmiştir. Grafiklerde mavi eğriler primer akımı, kırmızı eğriler sekonder akımı ve siyah eğriler ise farkı akımını göstermektedir.

7 SONUÇLAR

Tez konusu çalışma ile günümüzde giderek küçülen panel boyutları sebebiyle birbirine yaklaşan faz akımlarının, akım transformatörleri hata oranlarına etkisi incelenmiştir. Akım transformatörleri, uluslararası standartlarda belirtilen test metodlarına göre tek faz üzerinde test edilmekte, fakat kullanıldığı panellerde üç fazlı sistemlerde çalışmaktadır. Küçülen panel boyutları ve yaklaşan faz akımları, akım transformatörlerinde manyetik doymaya sebep olabilmekte, bu doyma da transformatörün hata oranlarını etkilemektedir. Yapılan bu çalışma ile günümüzde 36kV sistemlerde kullanılan 350mm faz arası açıklık ile yerleştirilen akım transformatörlerinde, tek faz yapılan testlerden farklı olarak, üç fazlı sistemde hata değerlerinin etkilendiği ve bazı noktalarda etiket değerlerinin sağlanamadığı görülmüştür. Özellikle yüksek akımlarda kullanılan koruma fonksiyonu incelendiğinde, 40kA akımda tek faz testte 5P hata sınıfını karşılayan bir akım transformatörü, üç faz test edildiği takdirde 12.5kA'den sonra 5P hata sınıfının dışına çıkmaktadır. Kullanılacak olan elektrik sisteminin güvenilirliği, insan can ve mal güvenliği konusunda hayati önem taşıyan koruma fonksiyonun görevini tam anlamıyla yerine getirmesine bağlıdır. Tez konusu çalışmada belirtilen ve üç fazlı sistemlerde meydana gelen bu etki tasarım uzmanları tarafından göz ardı edilmemeli, gerekli tedbirler alınmalıdır. Aksi takdirde, sistemin korunması açısından büyük risk oluşabilecektir.

Tezin 2. aşamasında, akım transformatörlerinin farklı açılar ile iletken baralar üzerine yerleştirilmesi durumunda hata değerlerinin değişimi incelenmiştir. Yapılan deney sonucunda, transformatörler ilk deneydeki düz konumlarındayken alınan sonuçlara yakın sonuçlar alınmış olup, transformatörlerin montaj açılarının belirli bir değeri geçmeyecek şekilde farklılık göstermesi durumunda hata oranlarının değişmediği sonucuna varılmıştır. Yapılan deney ile ilgili sonuçlar tez kapsamında verilmiş olup, tasarımcıların akıllarındaki bu konu ile ilgili problemlere çözüm bulunmaya çalışılmıştır.

Tez konusunun devam çalışması olarak, akım transformatörlerinde komşu faz akımları nedeniyle meydana gelen doyma ve hata oranları değişimi daha detaylı incelenerek, bu etkiyi ortadan kaldıracak gerekli manyetik ekranlama yöntemleri üzerinde çalışılabilecektir. Ayrıca, deney sonuçları göz önünde bulundurularak, detaylı manyetik analizlere girilebilir, deney çıktısı olarak alınan sinyal bilgileri işlenerek optimum sonuç için çalışma yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **IEC 60044-1**, *Current Transformers*, Edition 1.2, 2003.
- [2] **Jenkins B. D.**, *Introduction To Instrument Transformers*, CRC Press, Cleveland, 1967.
- [3] **Zocholl S. E., Smaha D. W.**, *Current Transformer Concepts*, Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, 1992.
- [4] **IEEE Std. C37.110**, *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*, 1996.
- [5] **Meisel J.**, *Current Instrument Transformer Error Calculations*, AIEE Winter General Meeting, 1963.
- [6] **Conner E. E., Specht T. R.**, *Equivalent Circuits for Overcurrent Calculations of Current Transformers*, AIEE Winter General Meeting, 1958.
- [7] **WECC Relay Work Group**, *Relaying Current Transformer Application*, Western Electricity Coordinating Council, 2009.
- [8] **Fonti P.**, *Cahier Technique No: 195, Current Transformers, specification errors and solutions*, Schneider Electric, 2000.
- [9] **IEC 60044-8**, *Electronic Current Transformers*, First Edition, 2002-07
- [10] **Teyssandier C.**, *Cahier Technique No: 170, From Current Transformers to Hybrid Sensors in HV*, Schneider Electric, 1995.
- [11] **Kojovic L. A.**, *Comparative Performance Characteristics of Current Transformers and Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes*, IEEE, 2007.
- [12] **Kasztenny B., Mazereeuw J., DoCarmo H.**, *CT Saturation in Industrial Applications – Analysis and Application Guidelines*, IEEE, 2007.
- [13] **Tümay M., Simpson R. R. S., El-Khatroushi H.**, *Dynamic Model of a Current Transformer*, International Journal of Electrical Engineering Education 37/3.

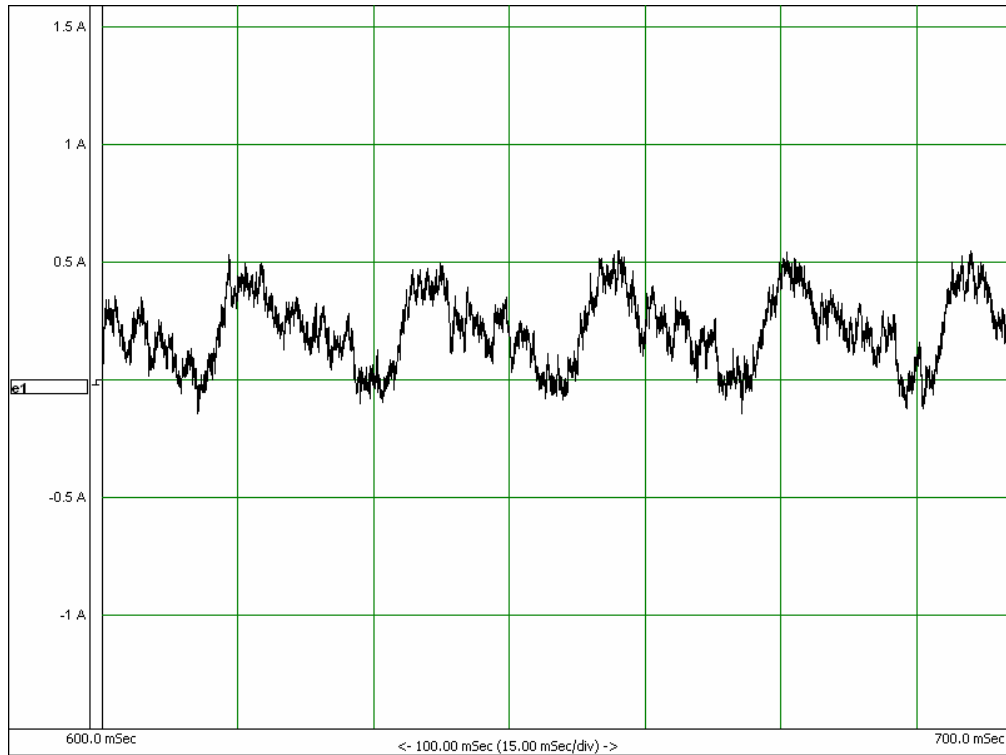
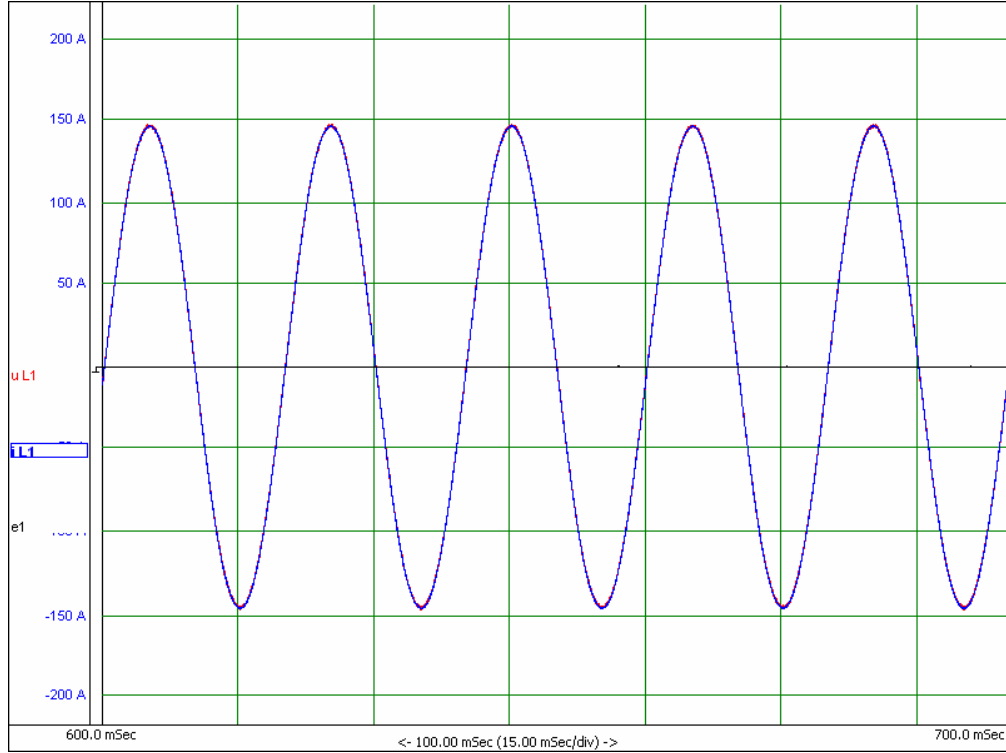
- [14] **El-Amin I. M., Al-Abbas H.**, *Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference, 2006.
- [15] **Fonti P.**, *Cahier Technique No: 194, Current Transformers, How to Specify them*, Schneider Electric, 2000.
- [16] <http://www.energy.siemens.com/co/en/power-distribution/medium-voltage-switchgear/ais-primary/simoprime.htm#content=Front%20and%20Side%20View> , 03.12.2010
- [17] <http://www.ulusoyelektrik.com.tr/page.php?ID=85> , 03.12.2010.
- [18] <http://www.ulusoyelektrik.com.tr/images/toroid3.jpg> , 03.12.2010.
- [19] **Jones K. W., Alcock M.**, *Addresing Window Type Transformer Proximity Errors*, GE ITI.
- [20] **Yu H.,Yuan J., Zou J.**, *Design of Novel Structure Current Transformer With Shielding Coils for Overcoming the Saturation of Core*, Department of EE Tsinghua University, Beijing, 2006.

EKLER

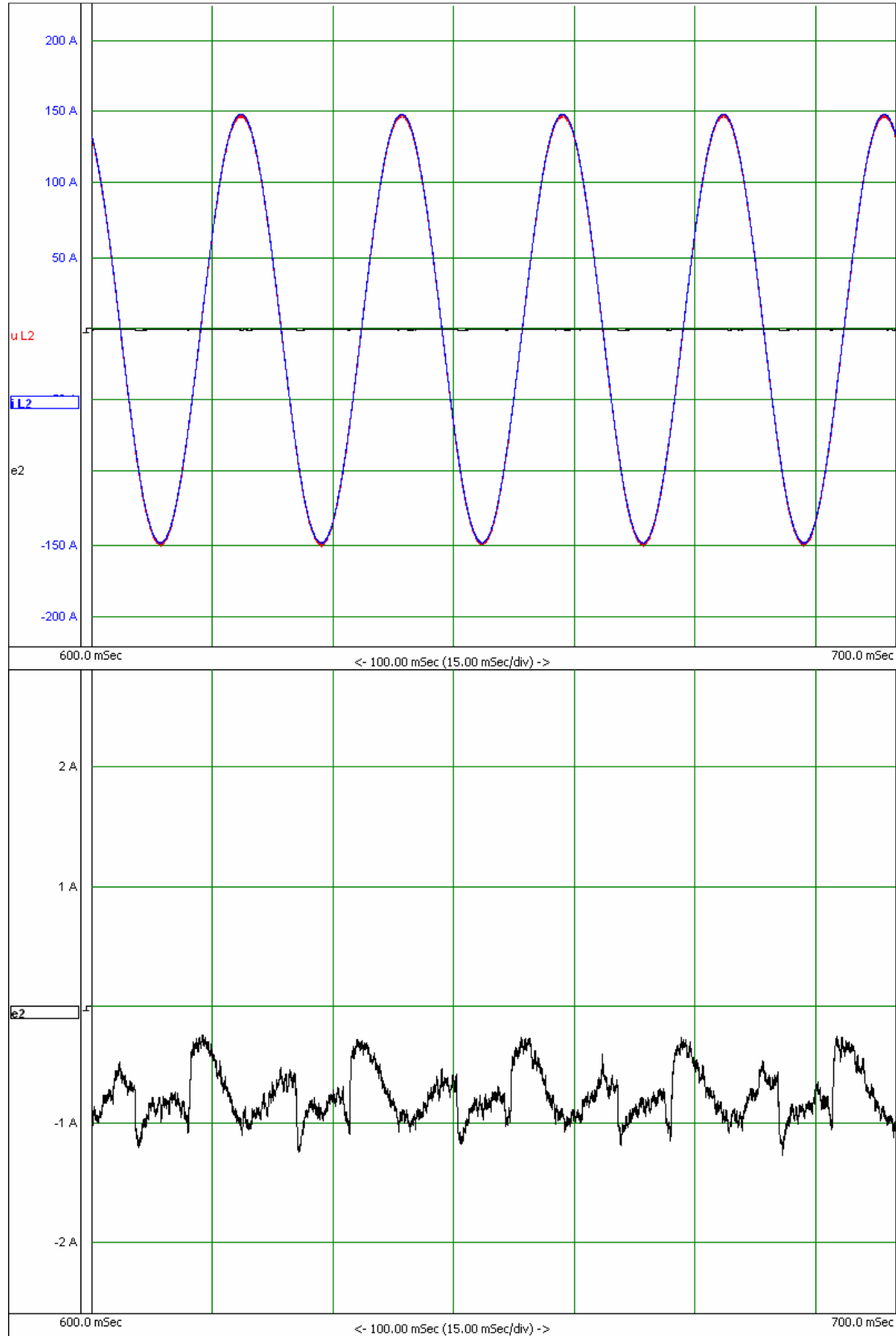
EK A.1: 1. Deney Hata Grafikleri

EK A.2: 2. Deney Hata Grafikleri

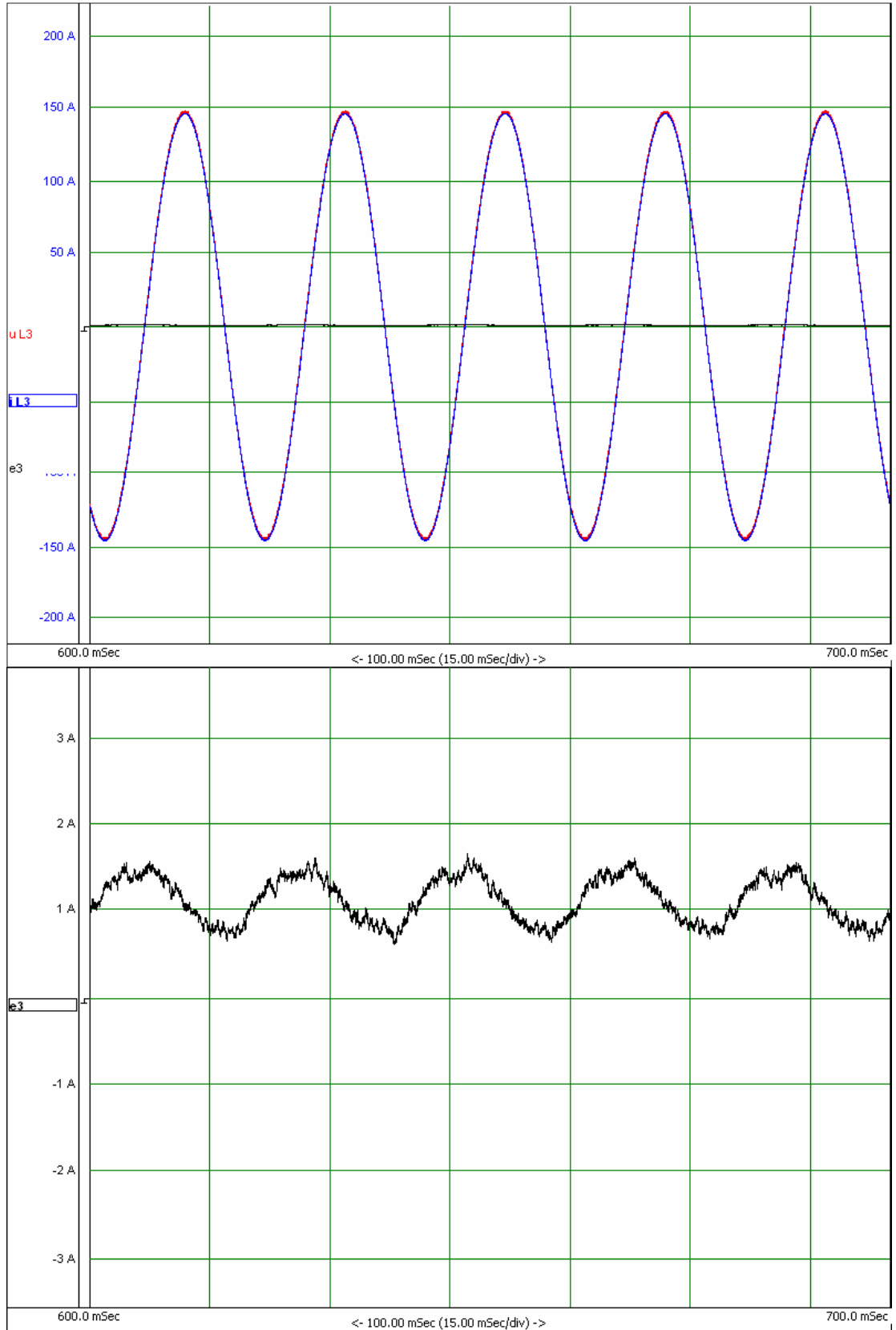
EK A.1



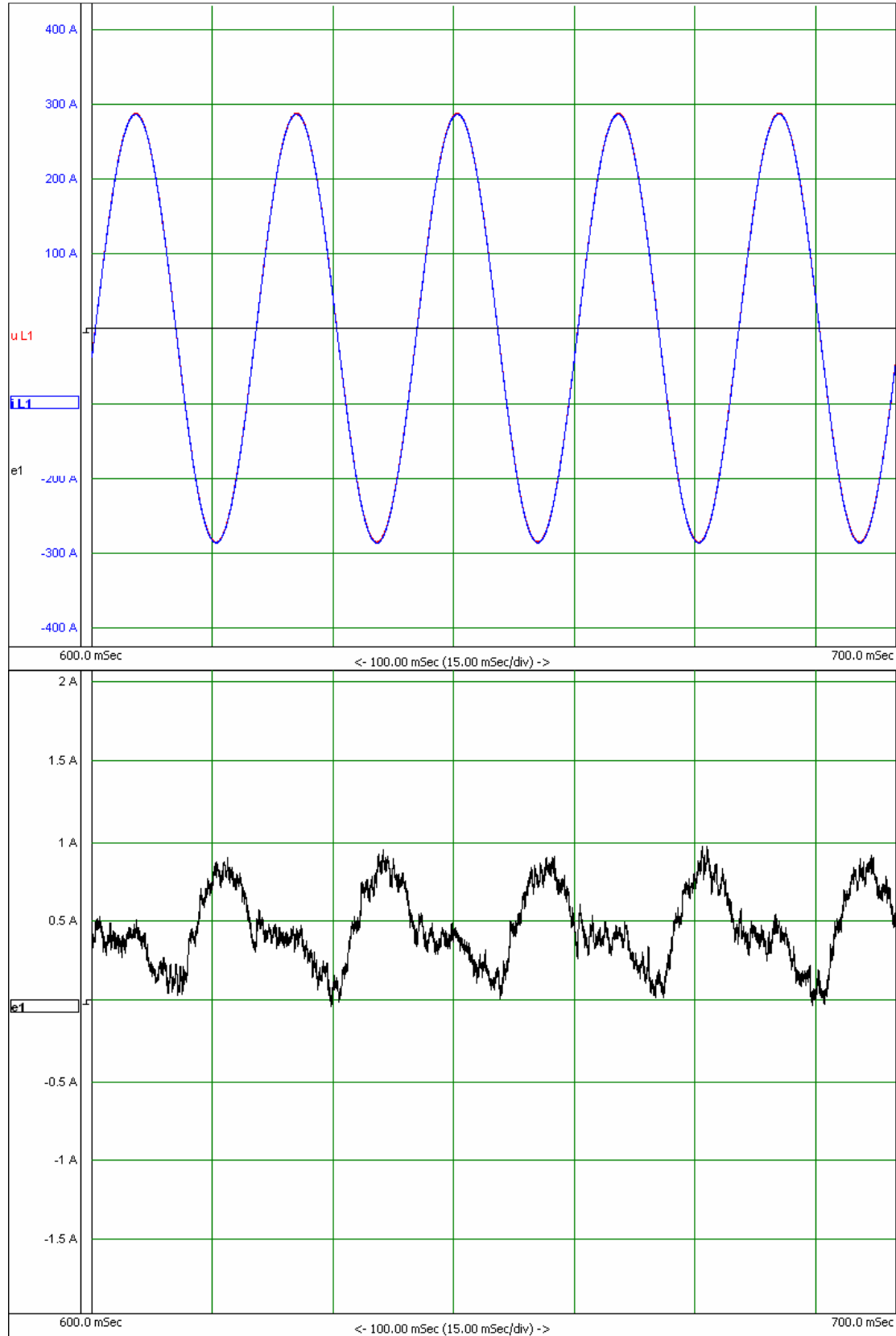
Şekil A.1.1 1.Test L1 Fazı Eğrileri



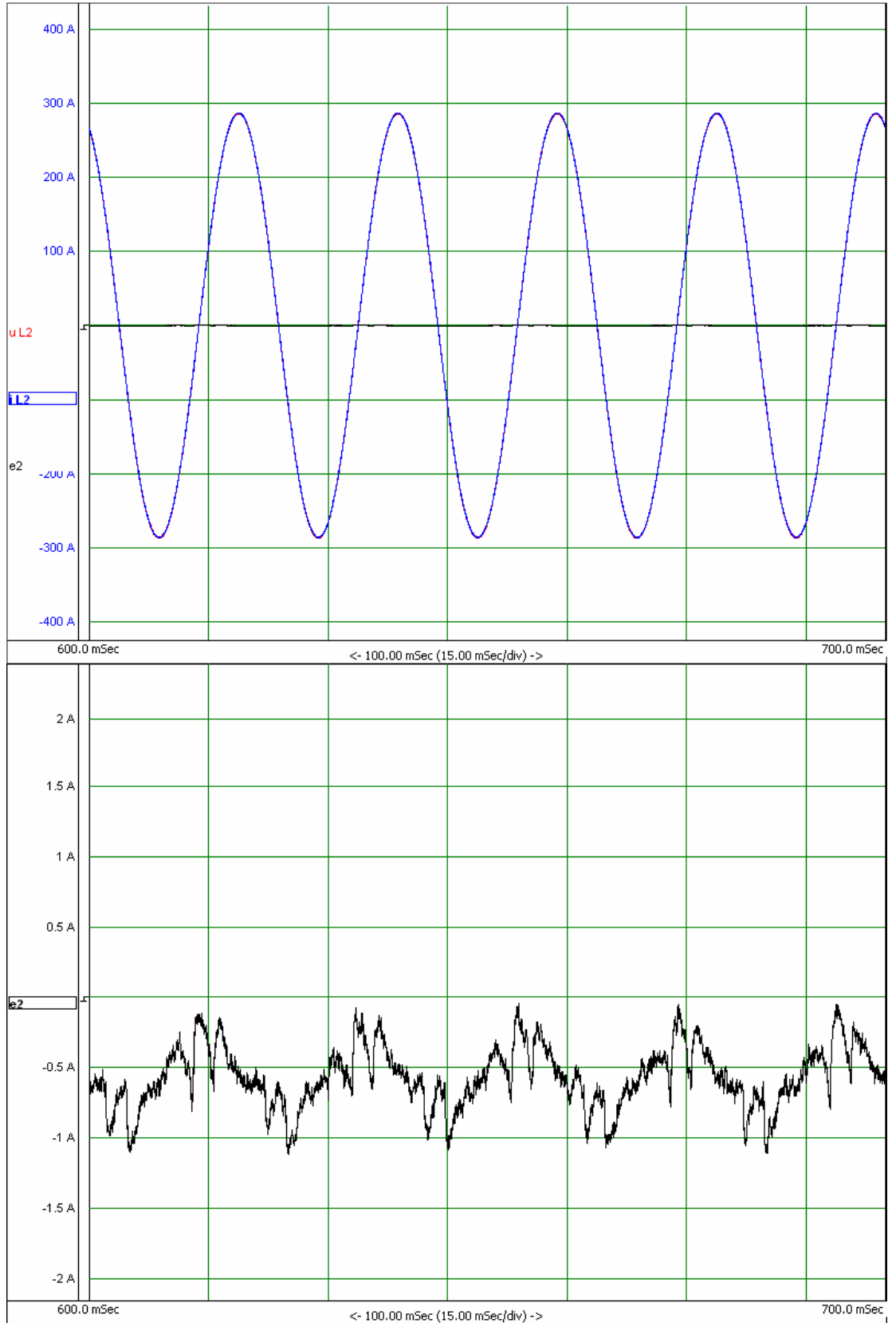
Şekil A.1.2 1.Test L2 Fazı Eğrileri



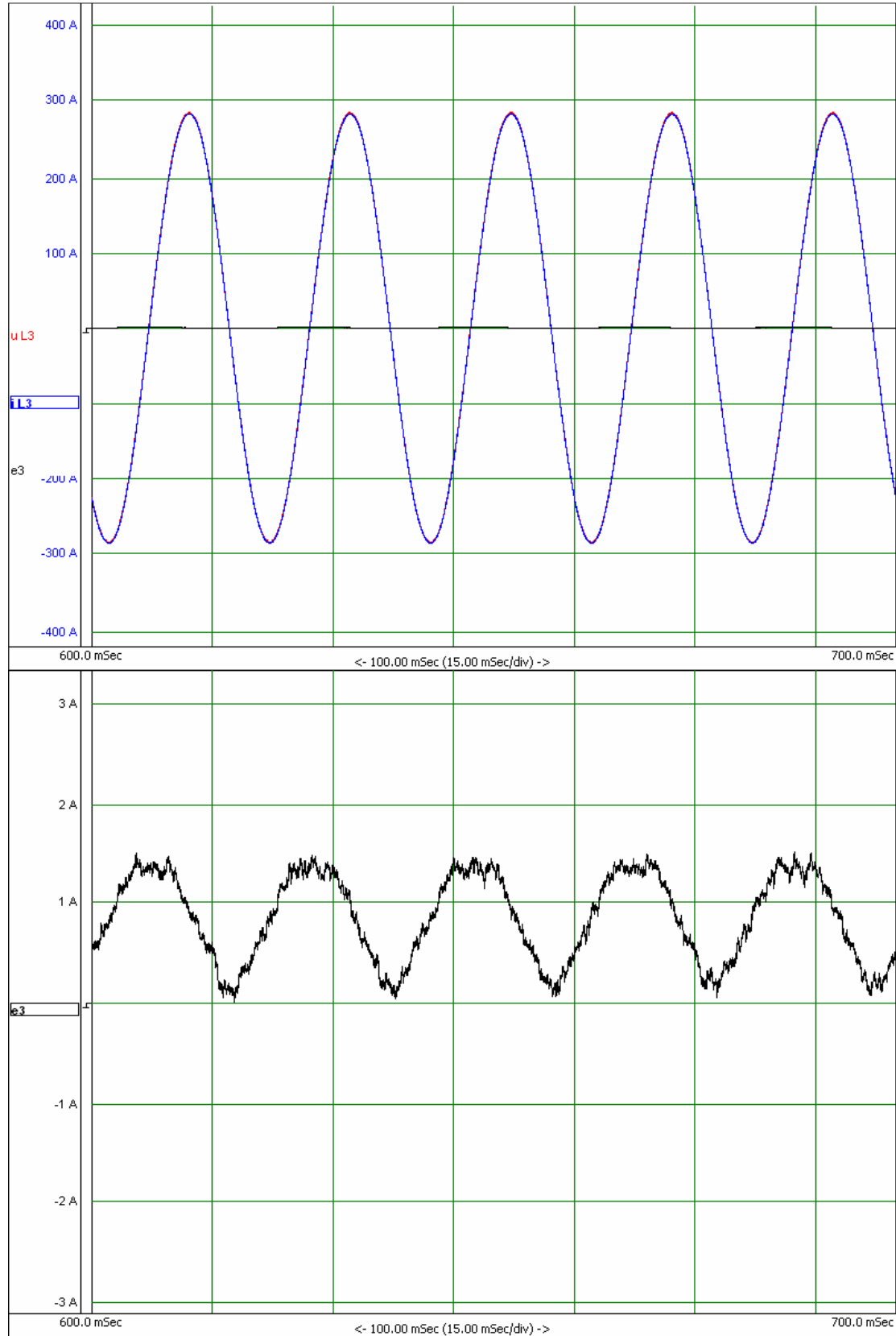
Şekil A.1.3 1.Test L3 Fazı Eğrileri



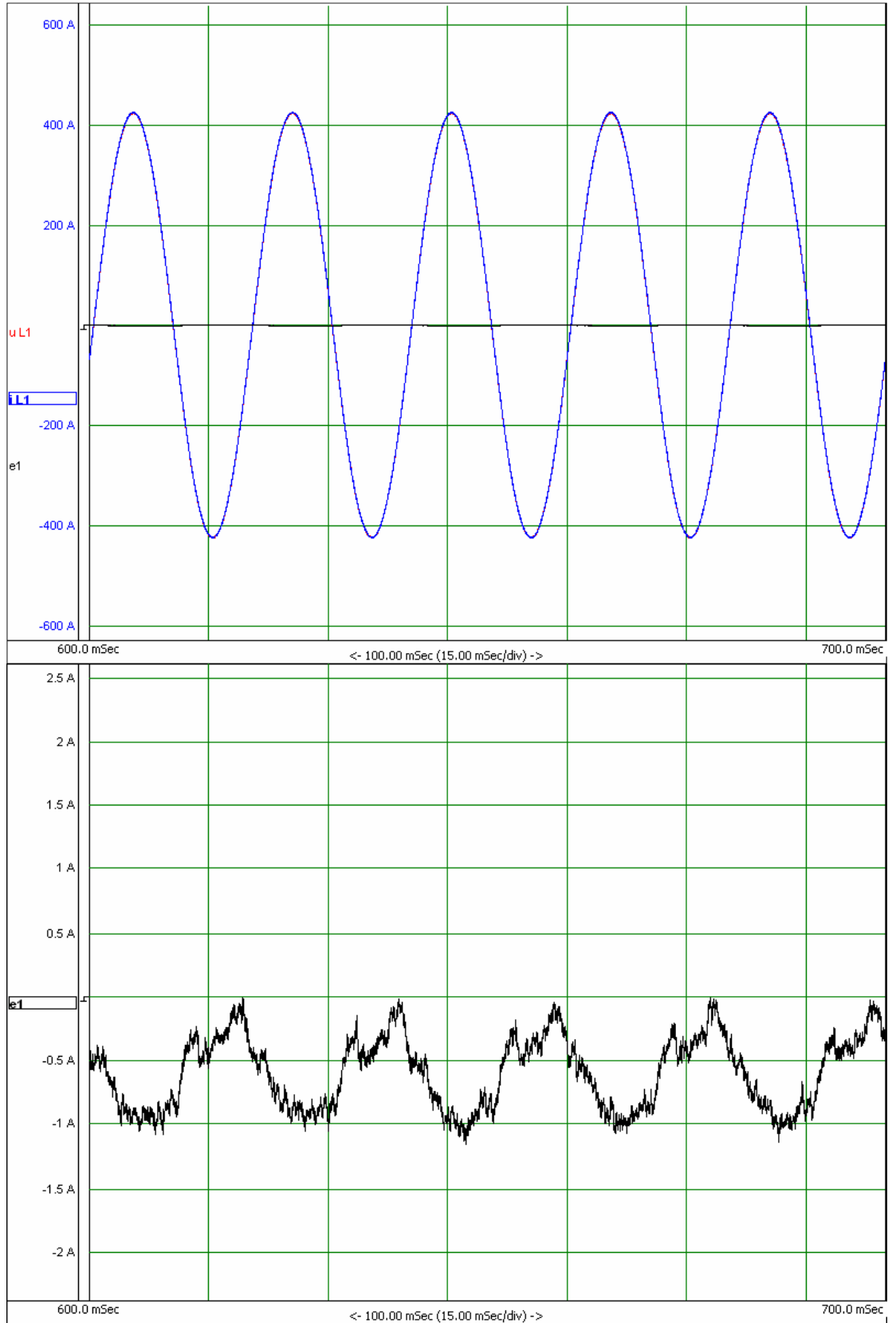
Şekil A.1.4 2.Test L1 Fazı Eğrileri



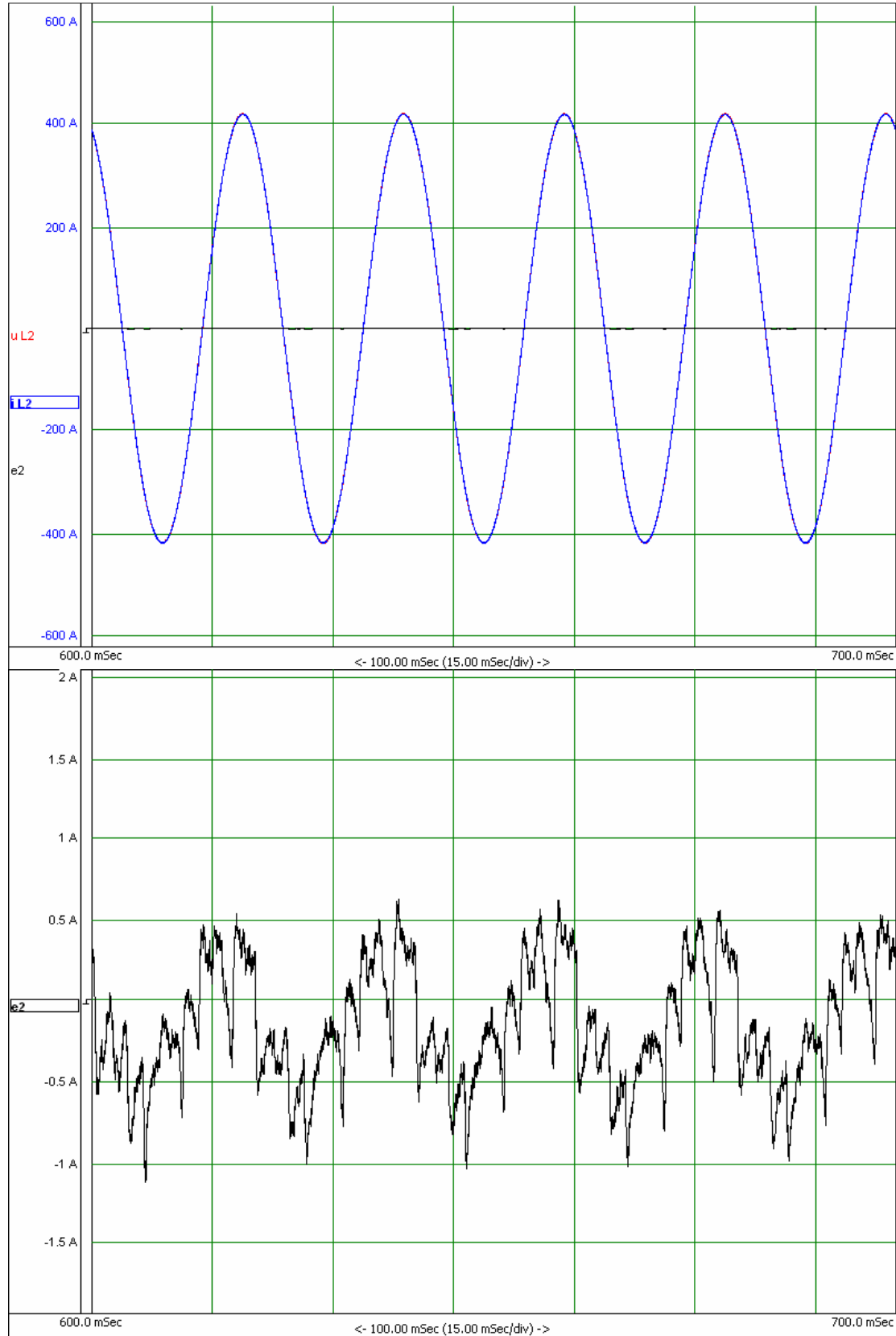
Şekil A.1.5 2.Test L2 Fazı Eğrileri



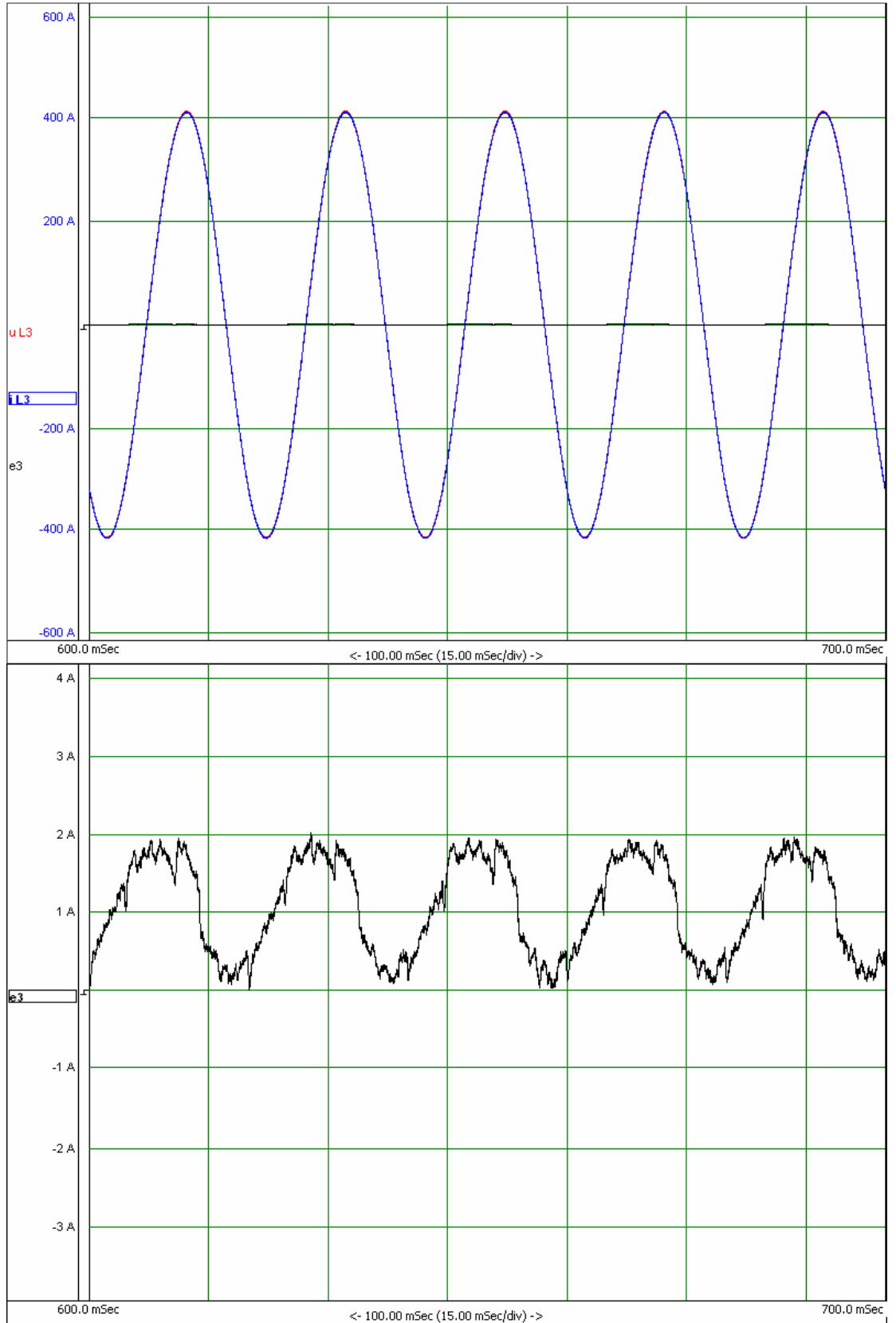
Şekil A.1.6 2.Test L3 Fazı Eğrileri



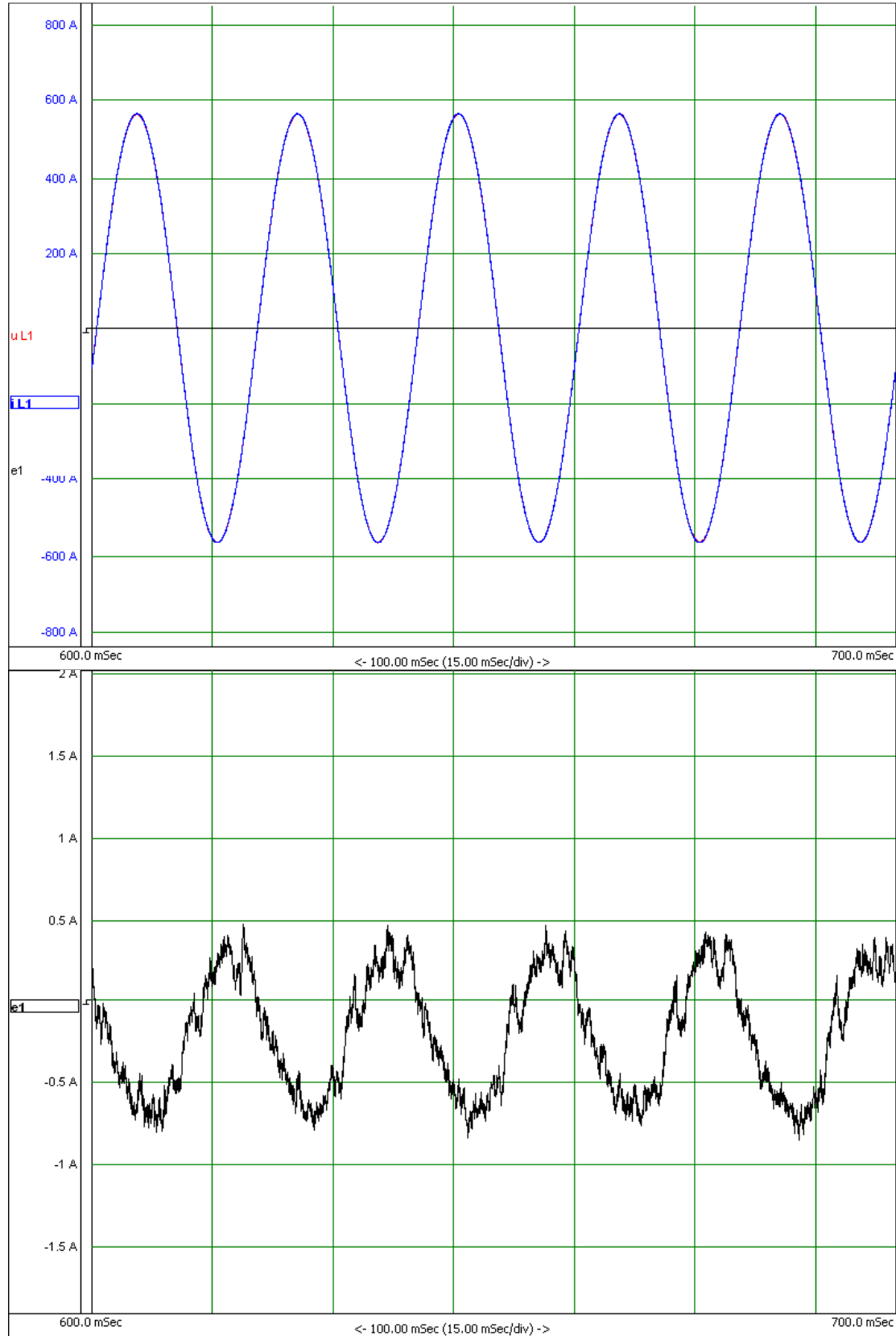
Şekil A.1.7 3.Test L1 Fazı Eğrileri



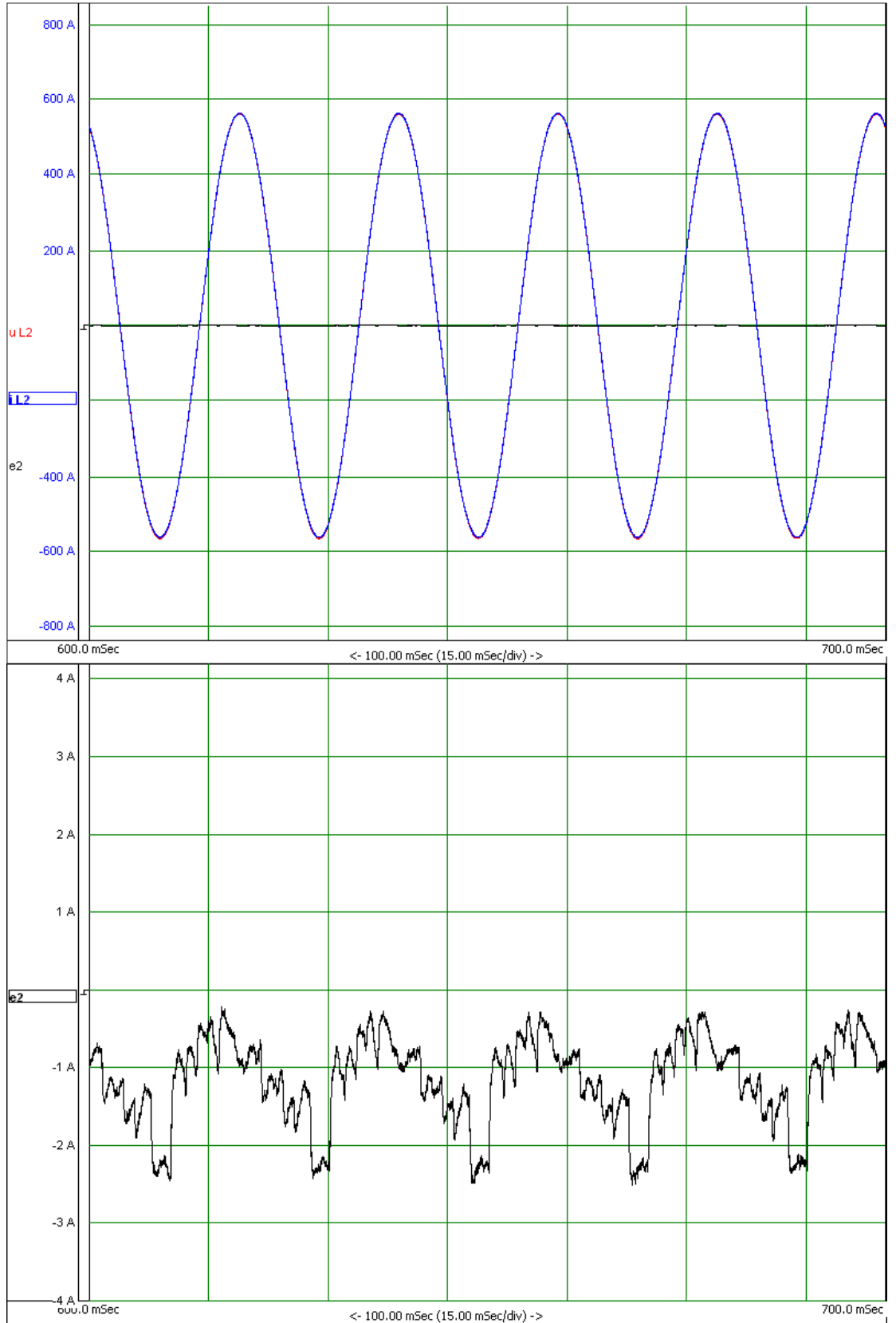
Şekil A.1.8 3.Test L2 Fazı Eğrileri



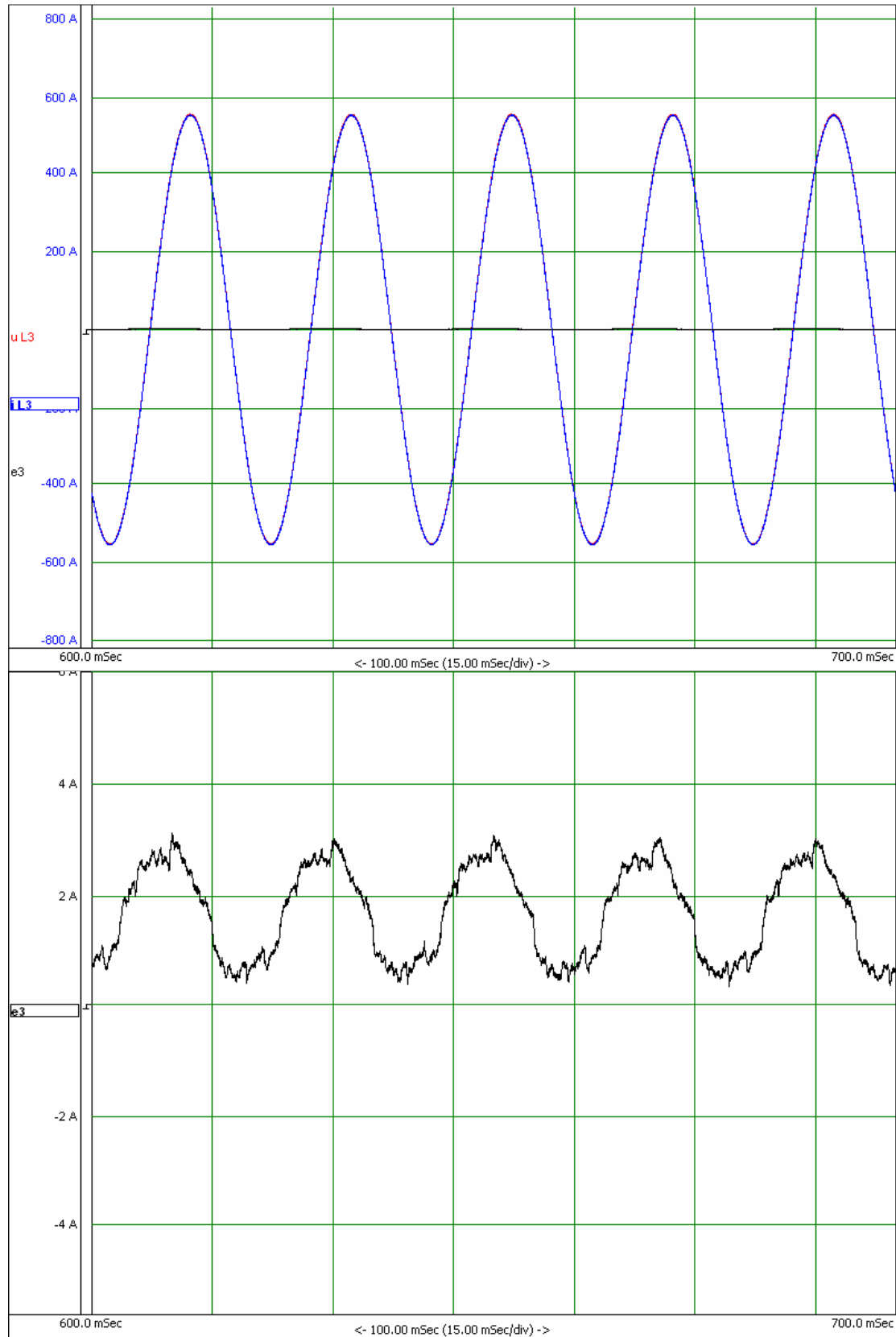
Şekil A.1.9 3.Test L3 Fazı Eğrileri



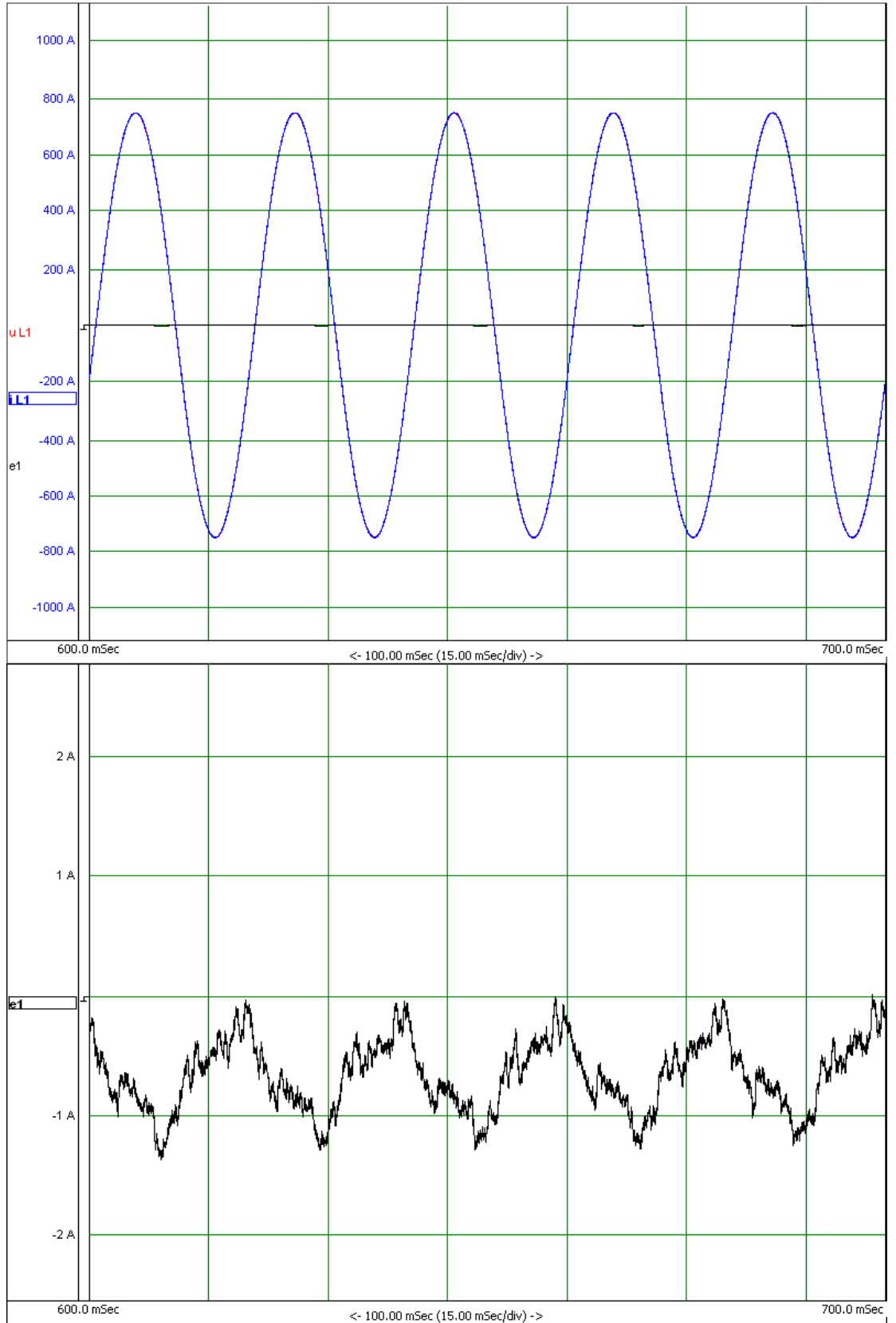
Şekil A.1.10 4.Test L1 Fazı Eğrileri



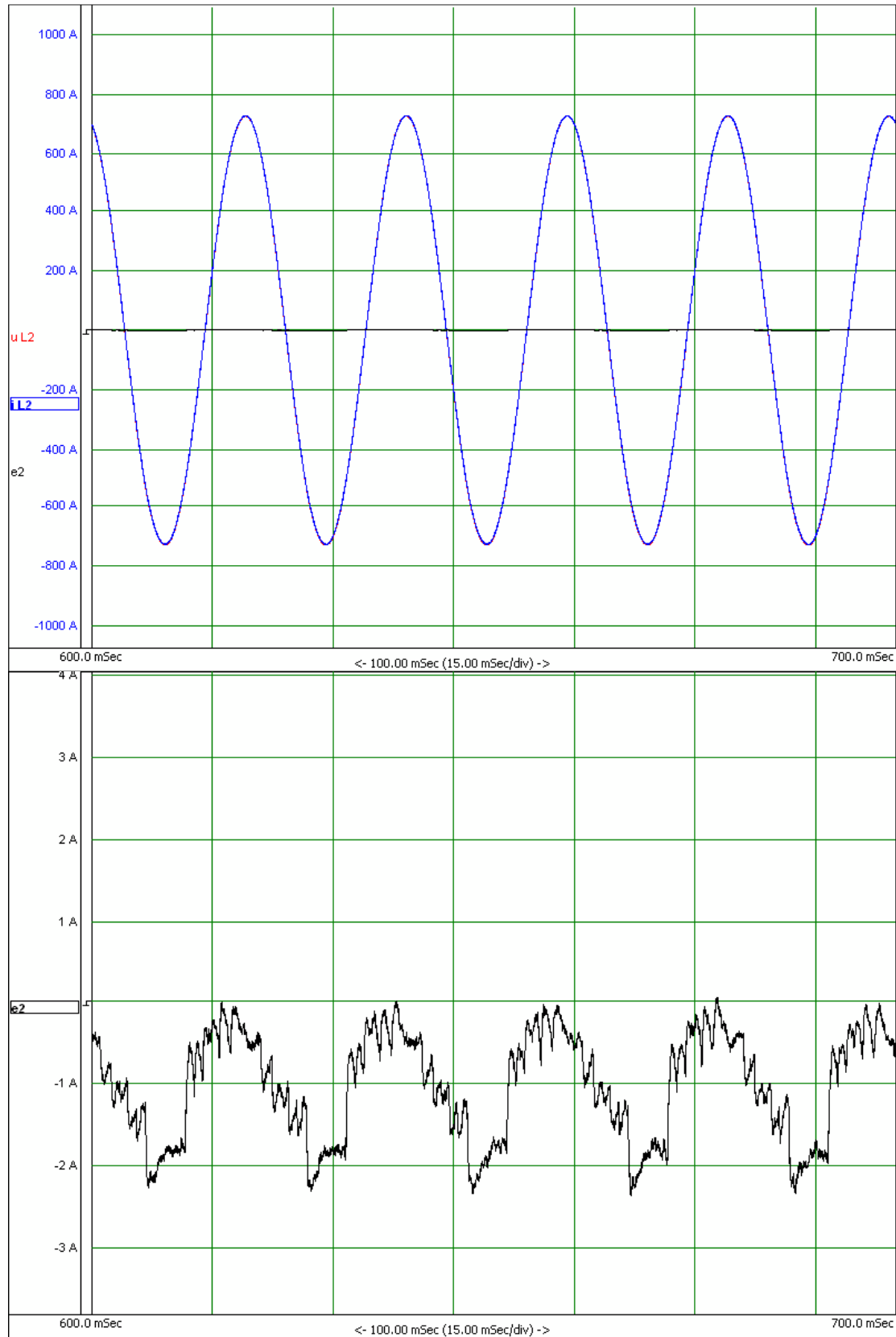
Şekil A.1.11 4.Test L2 Fazı Eğrileri



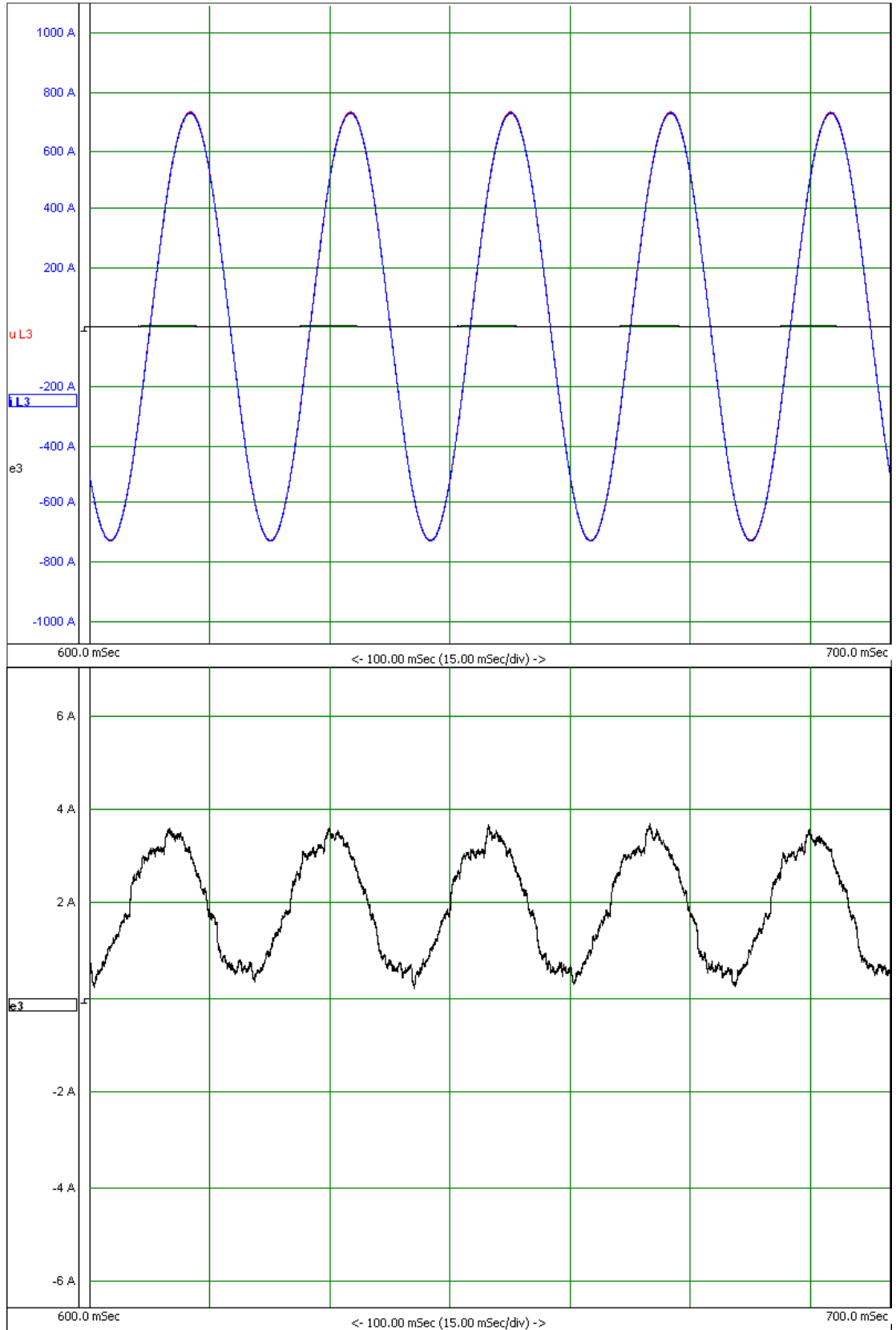
Şekil A.1.12 4.Test L3 Fazı Eğrileri



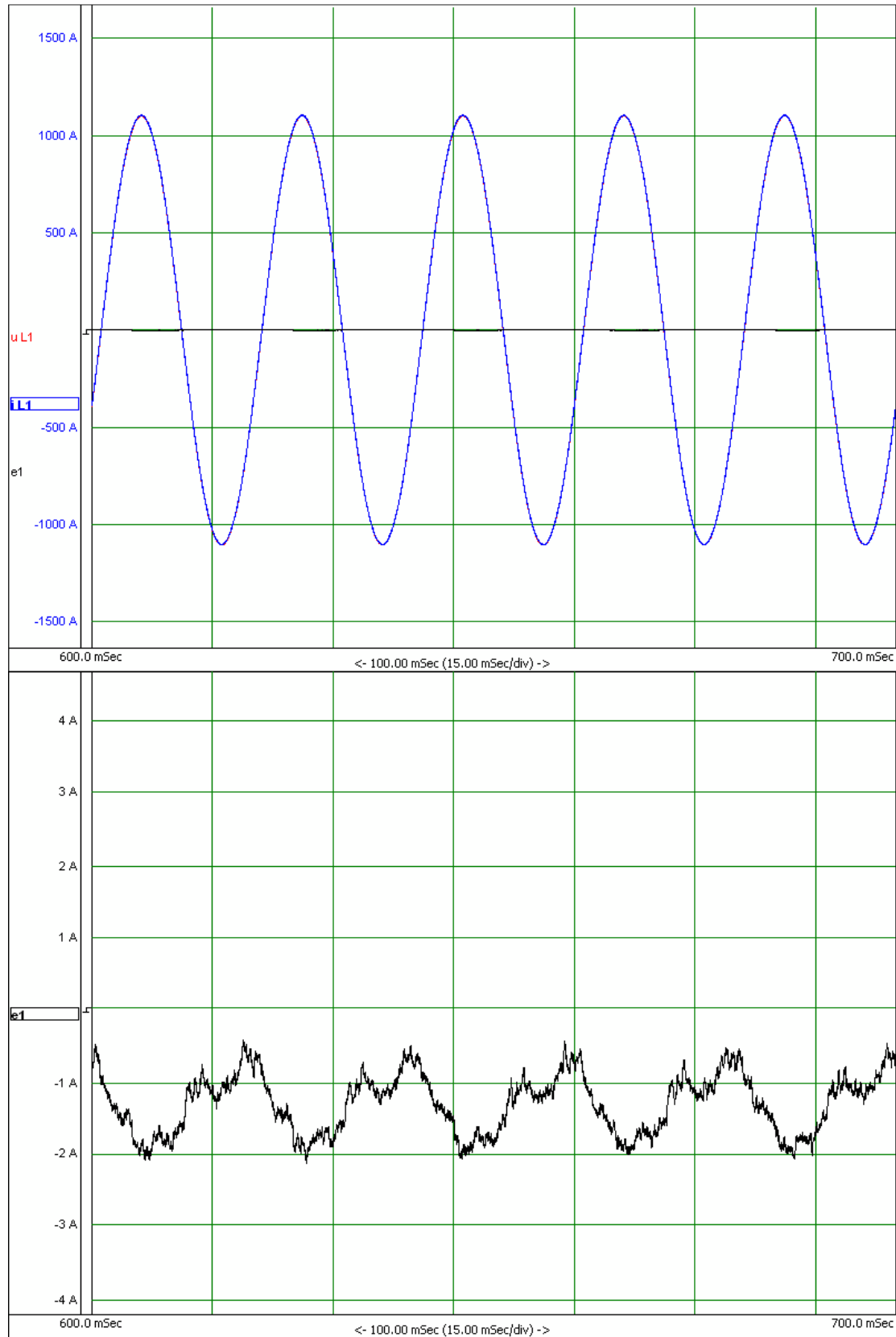
Şekil A.1.13 5.Test L1 Fazı Eğrileri



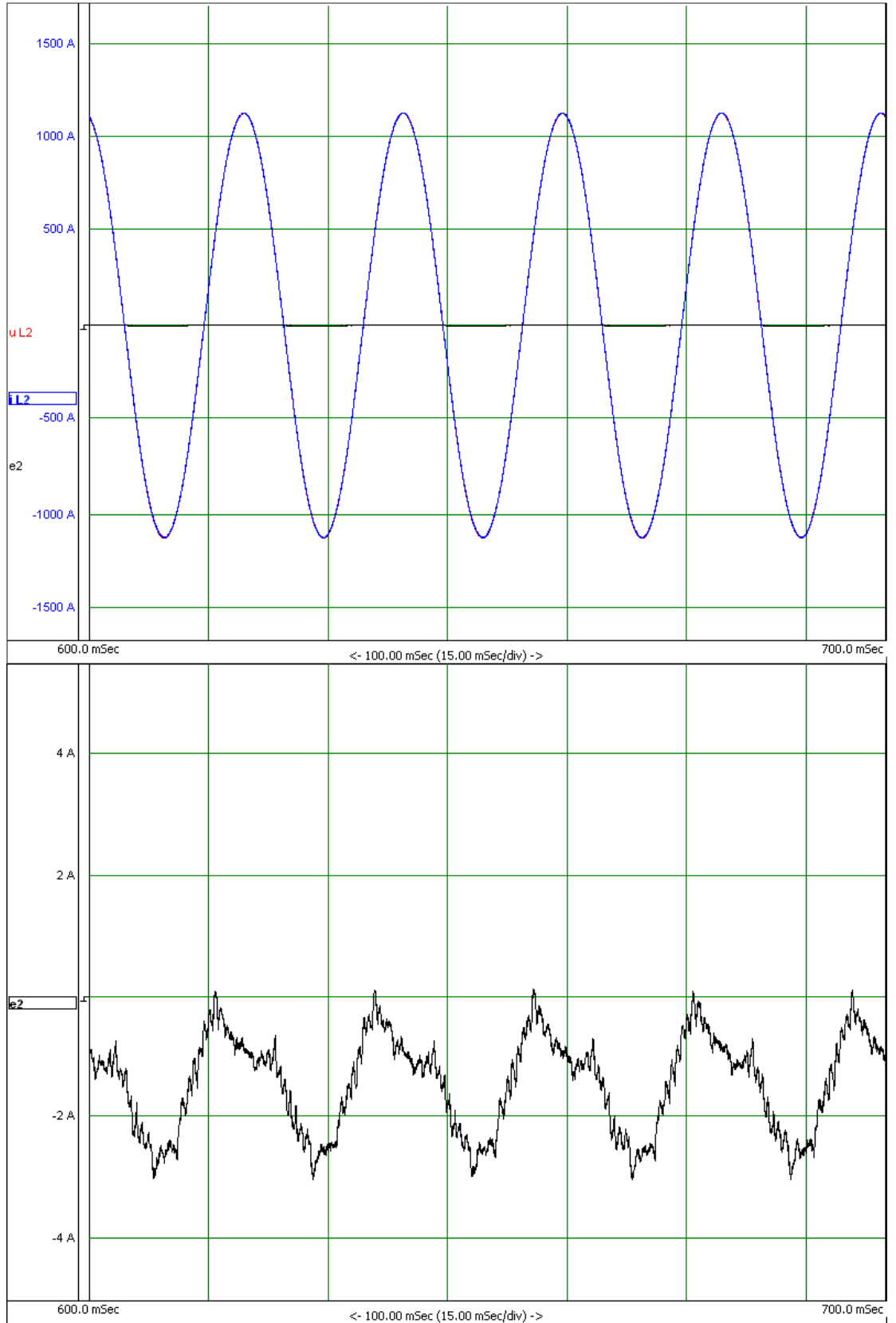
Şekil A.1.14 5.Test L2 Fazı Eğrileri



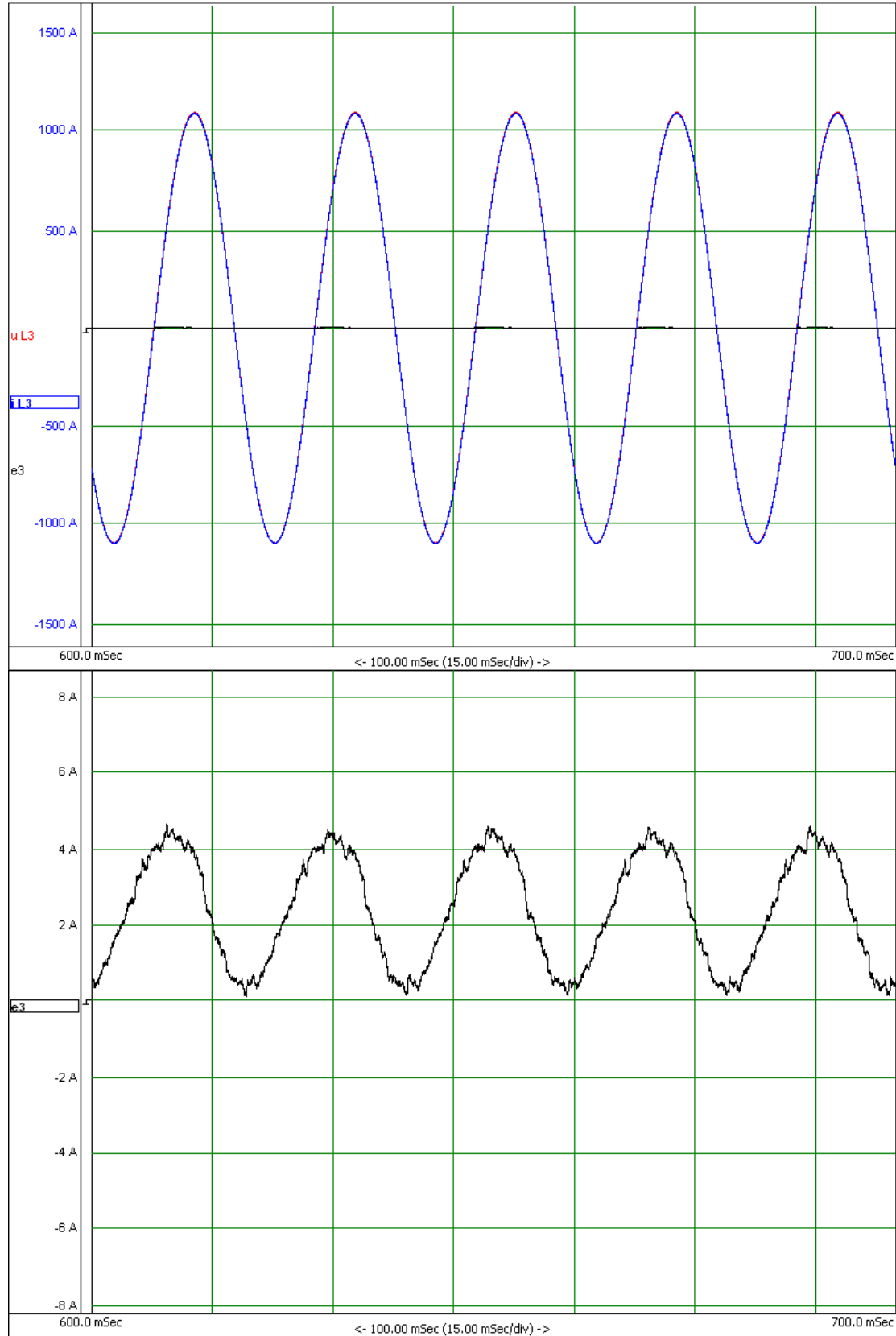
Şekil A.1.15 5.Test L3 Fazı Eğrileri



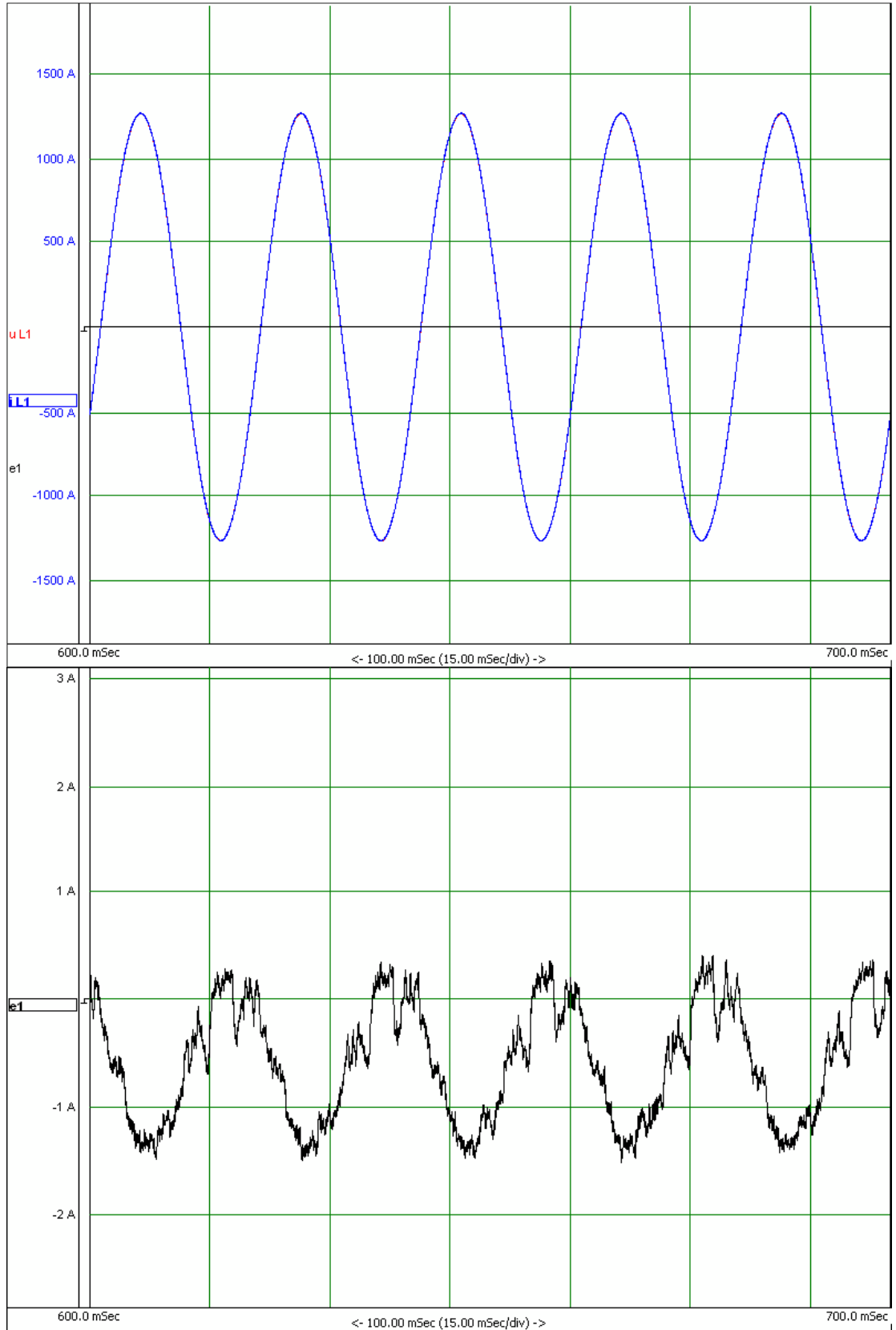
Şekil A.1.16 6.Test L1 Fazı Eğrileri



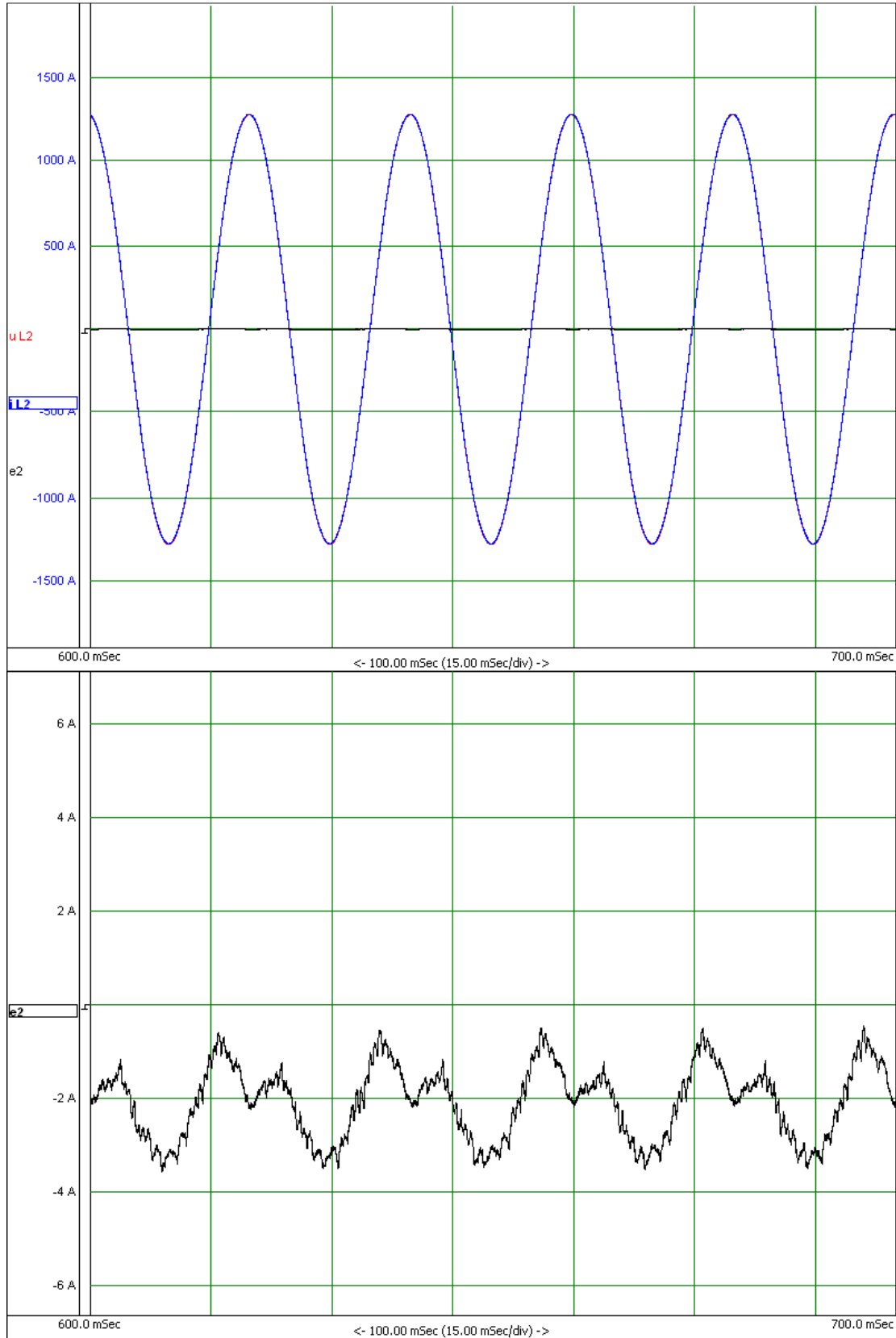
Şekil A.1.17 6.Test L2 Fazı Eğrileri



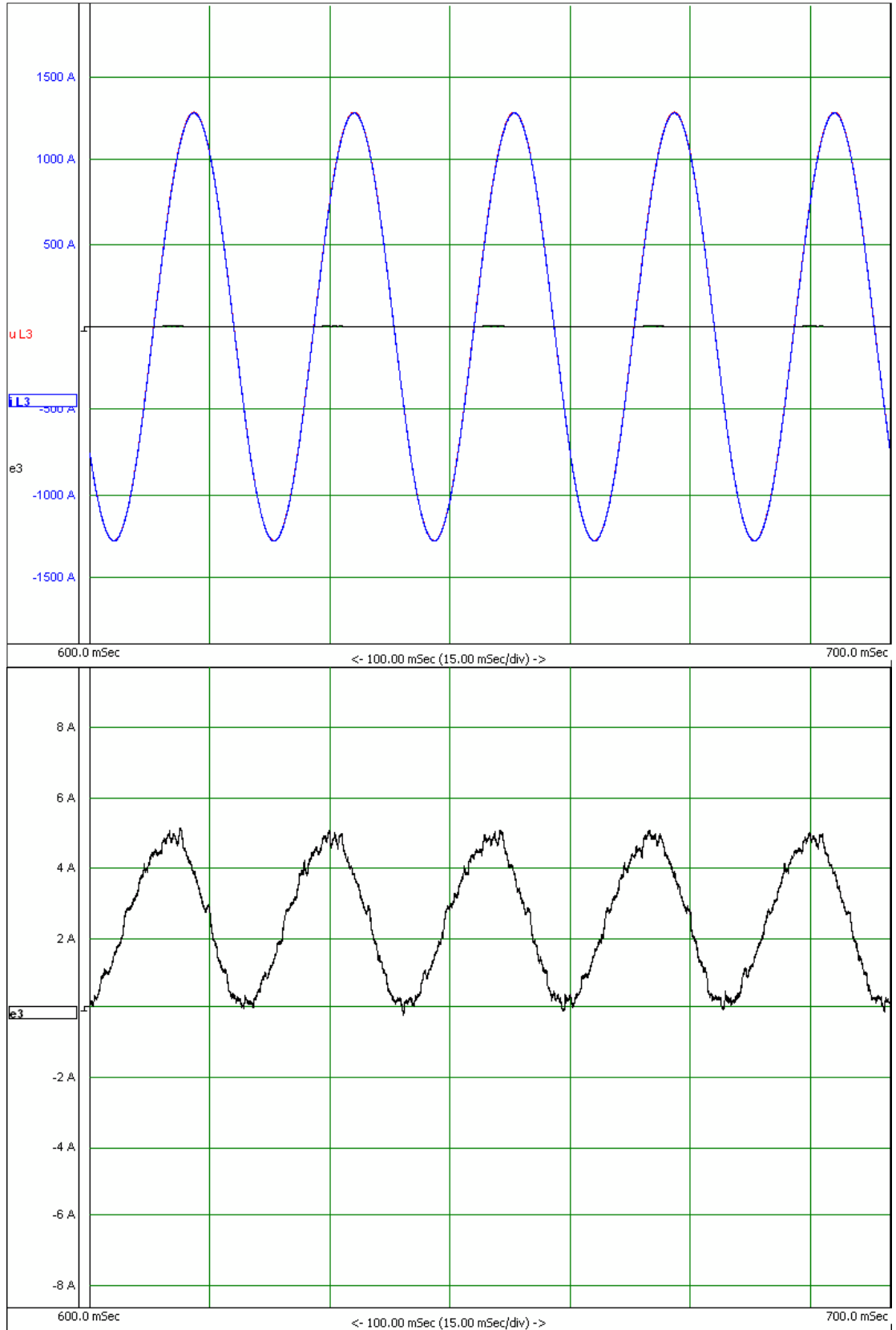
Şekil A.1.18 6.Test L3 Fazı Eğrileri



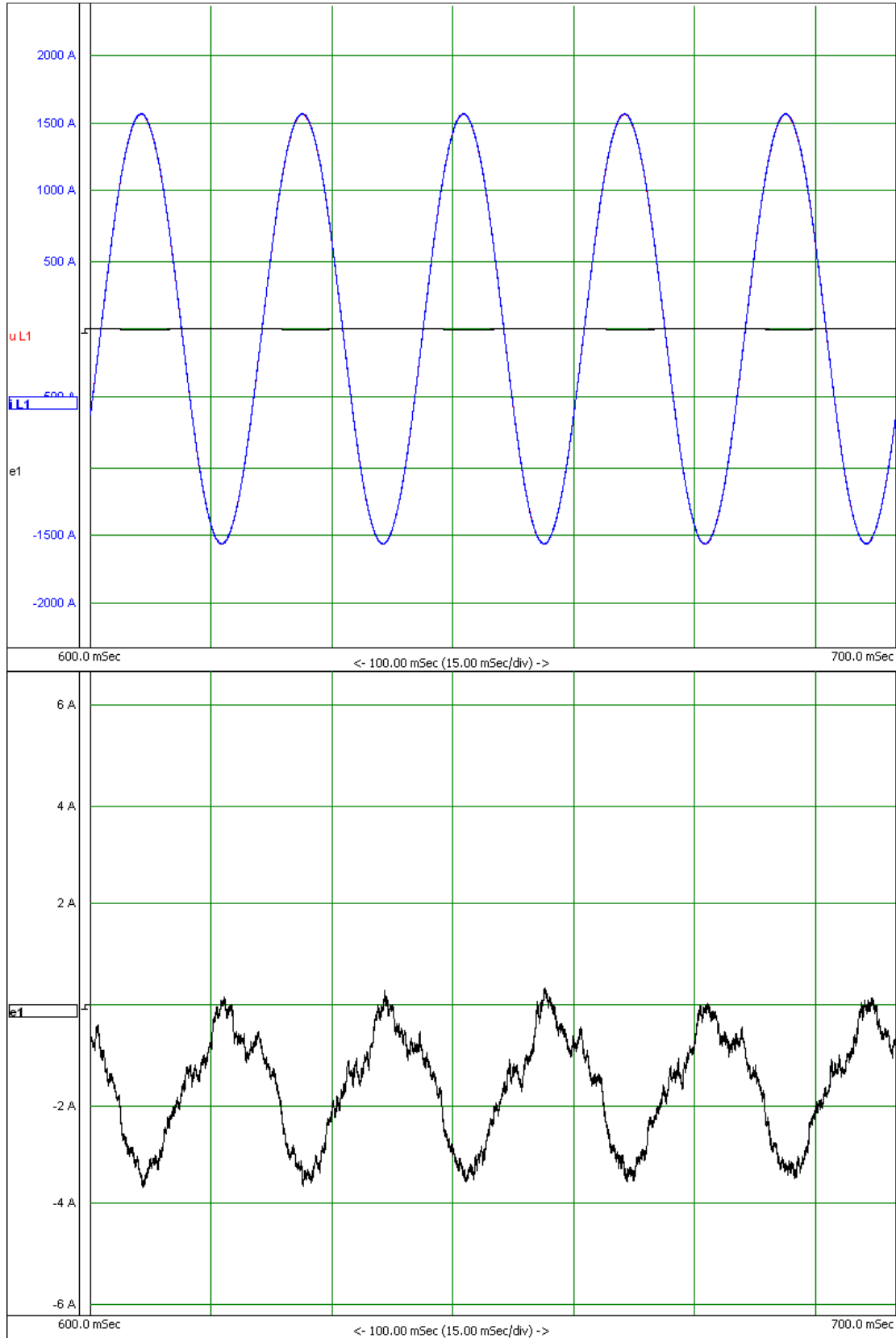
Şekil A.1.19 7.Test L1 Fazı Eğrileri



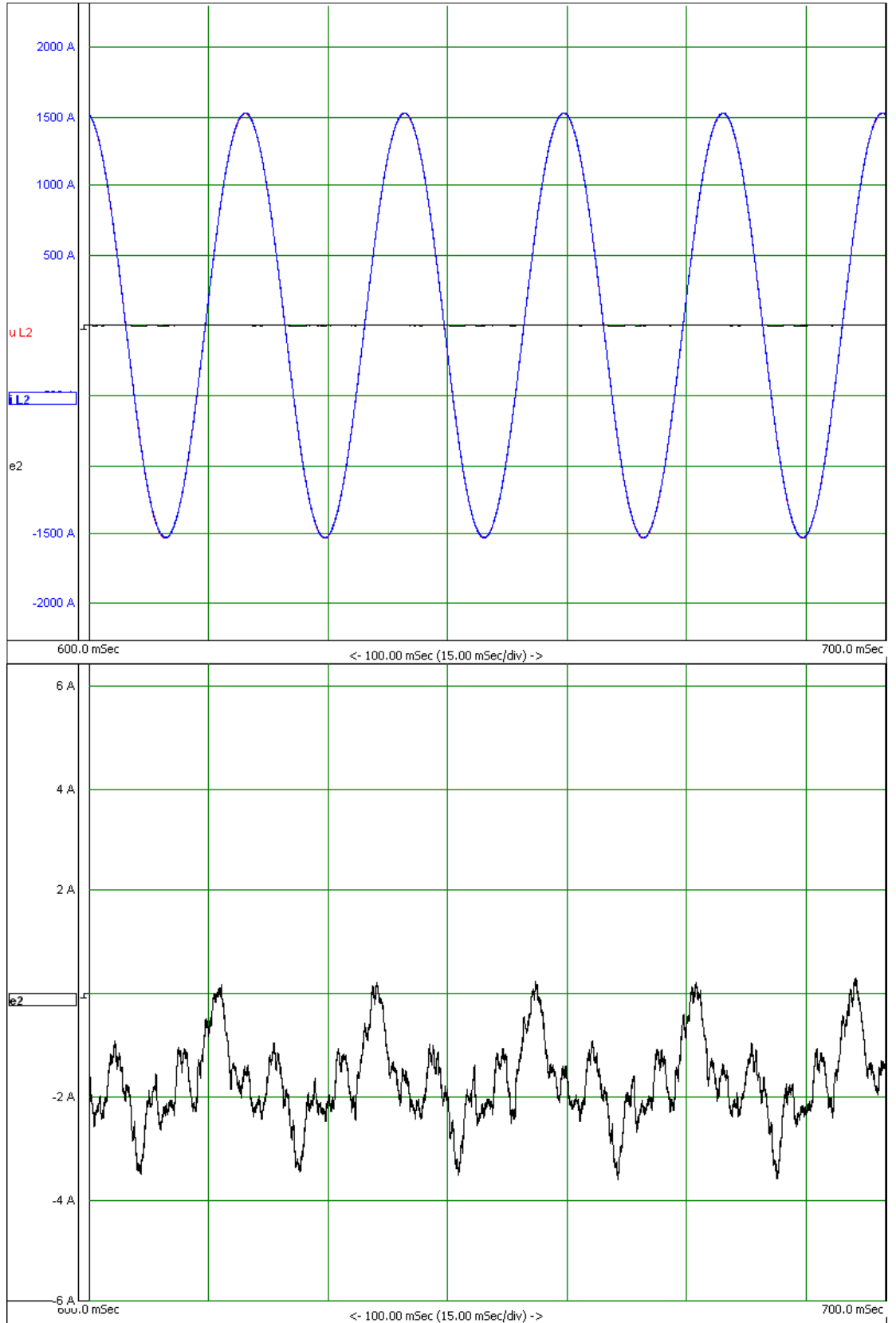
Şekil A.1.20 7.Test L2 Fazı Eğrileri



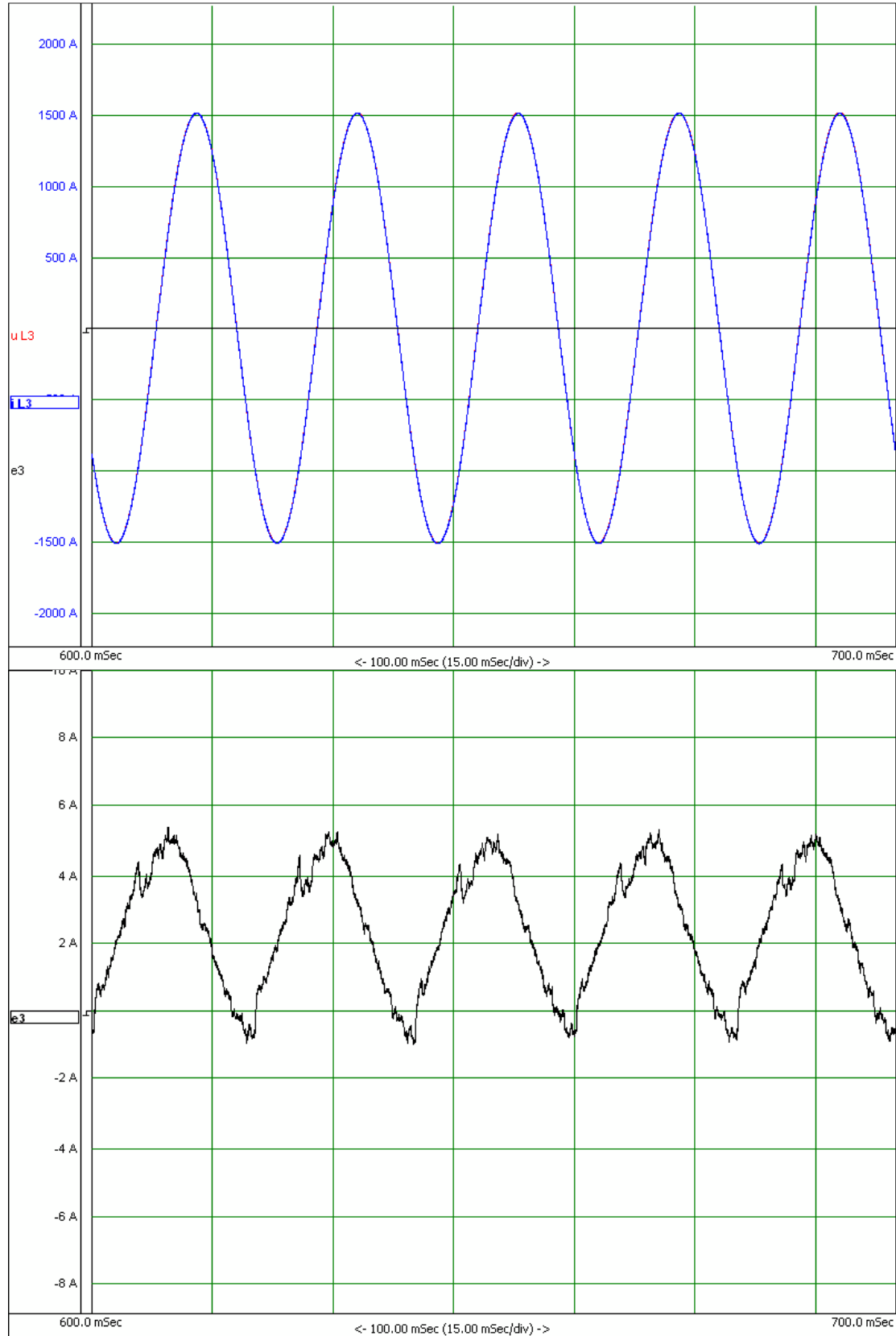
Şekil A.1.21 7.Test L3 Fazı Eğrileri



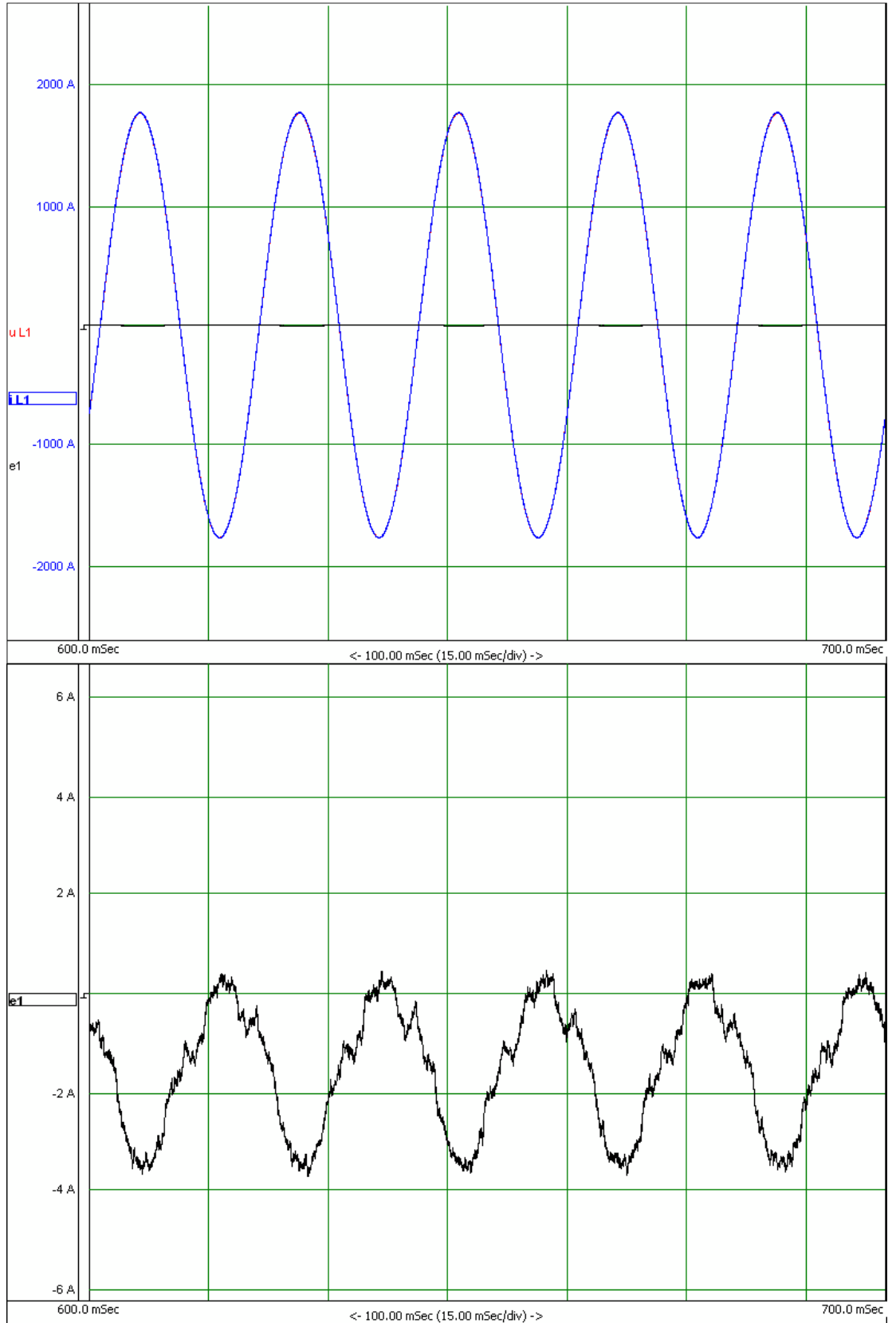
Şekil A.1.22 8.Test L1 Fazı Eğrileri



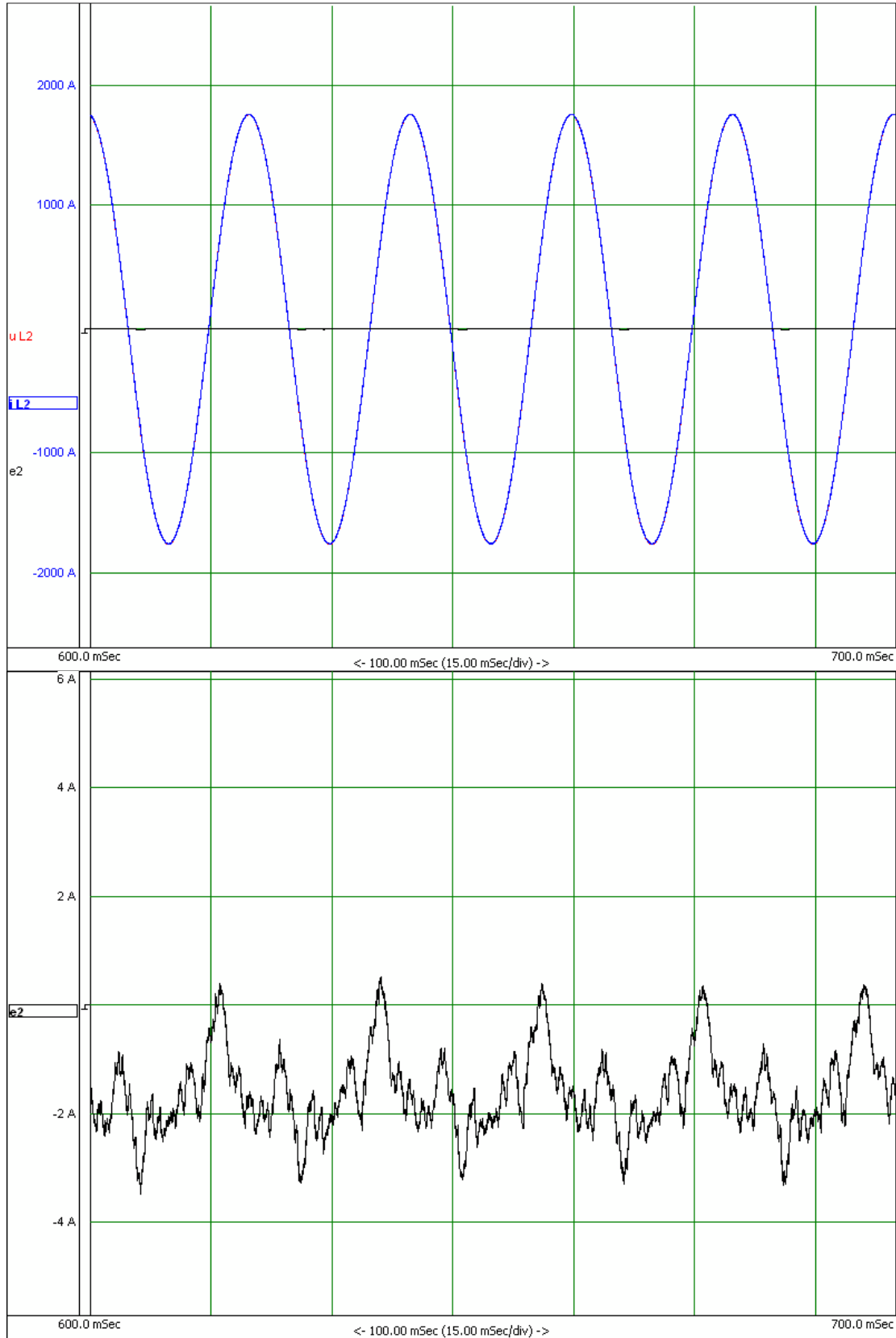
Şekil A.1.23 8.Test L2 Fazı Eğrileri



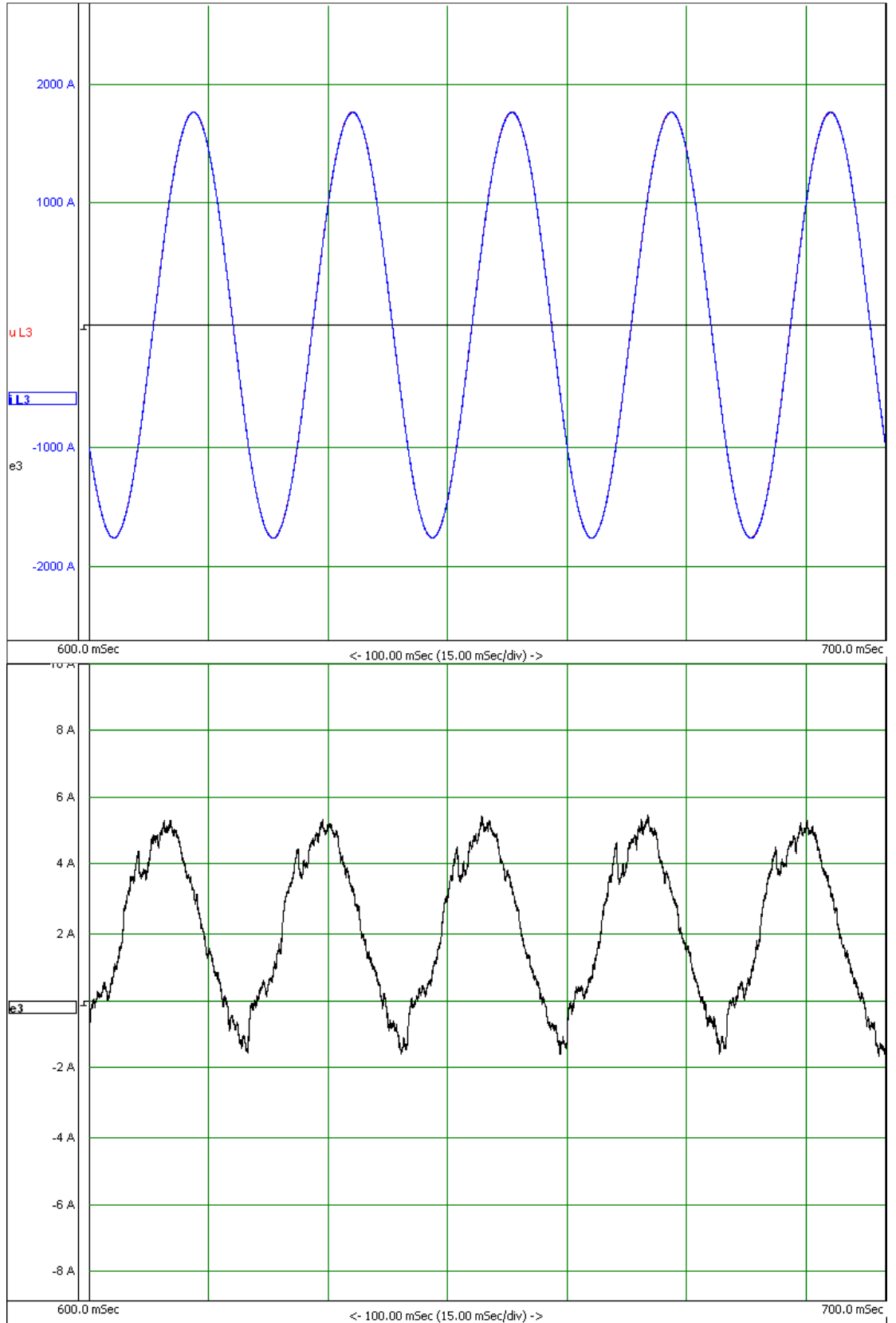
Şekil A.1.24 8.Test L3 Fazı Eğrileri



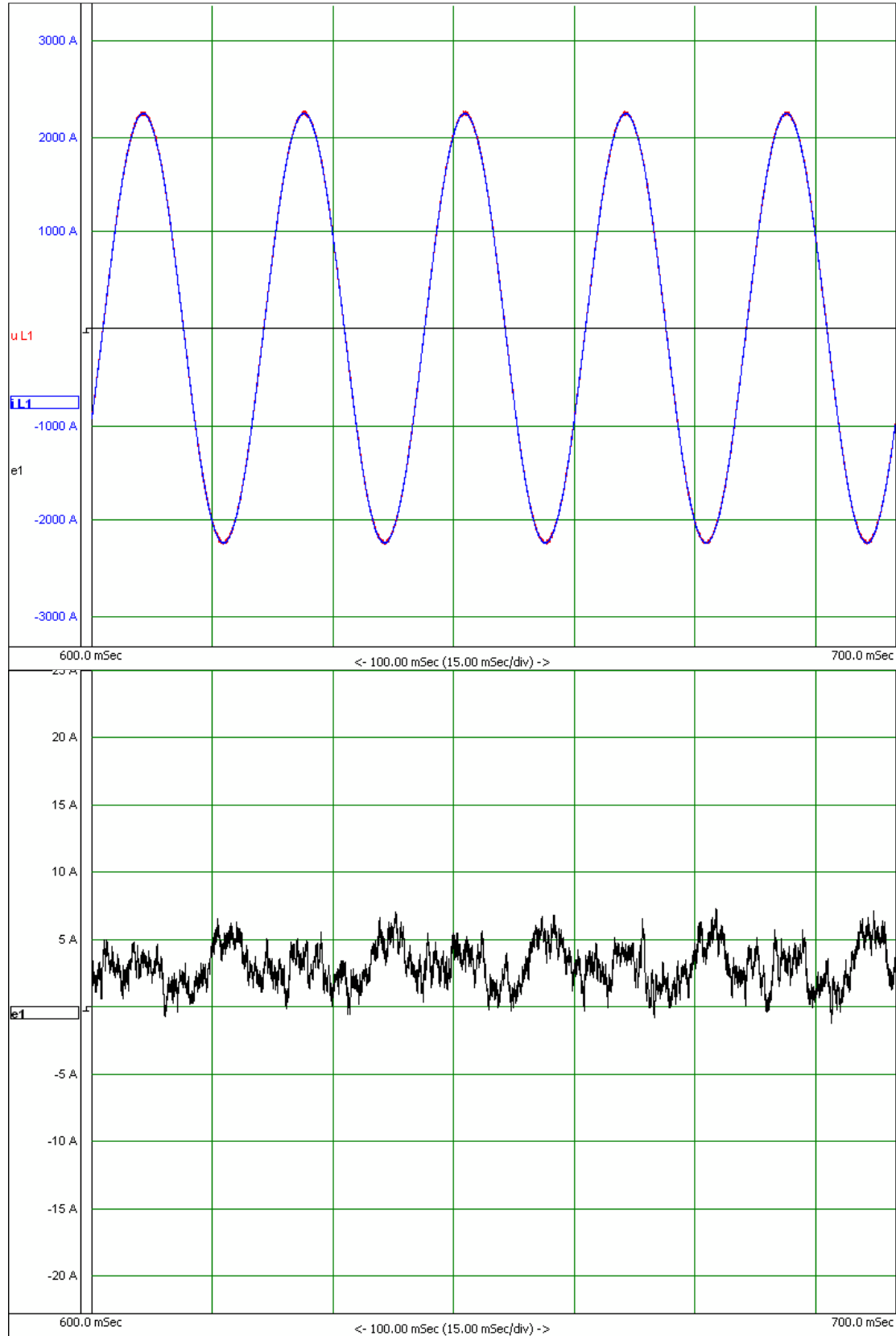
Şekil A.1.25 9.Test L1 Fazı Eğrileri



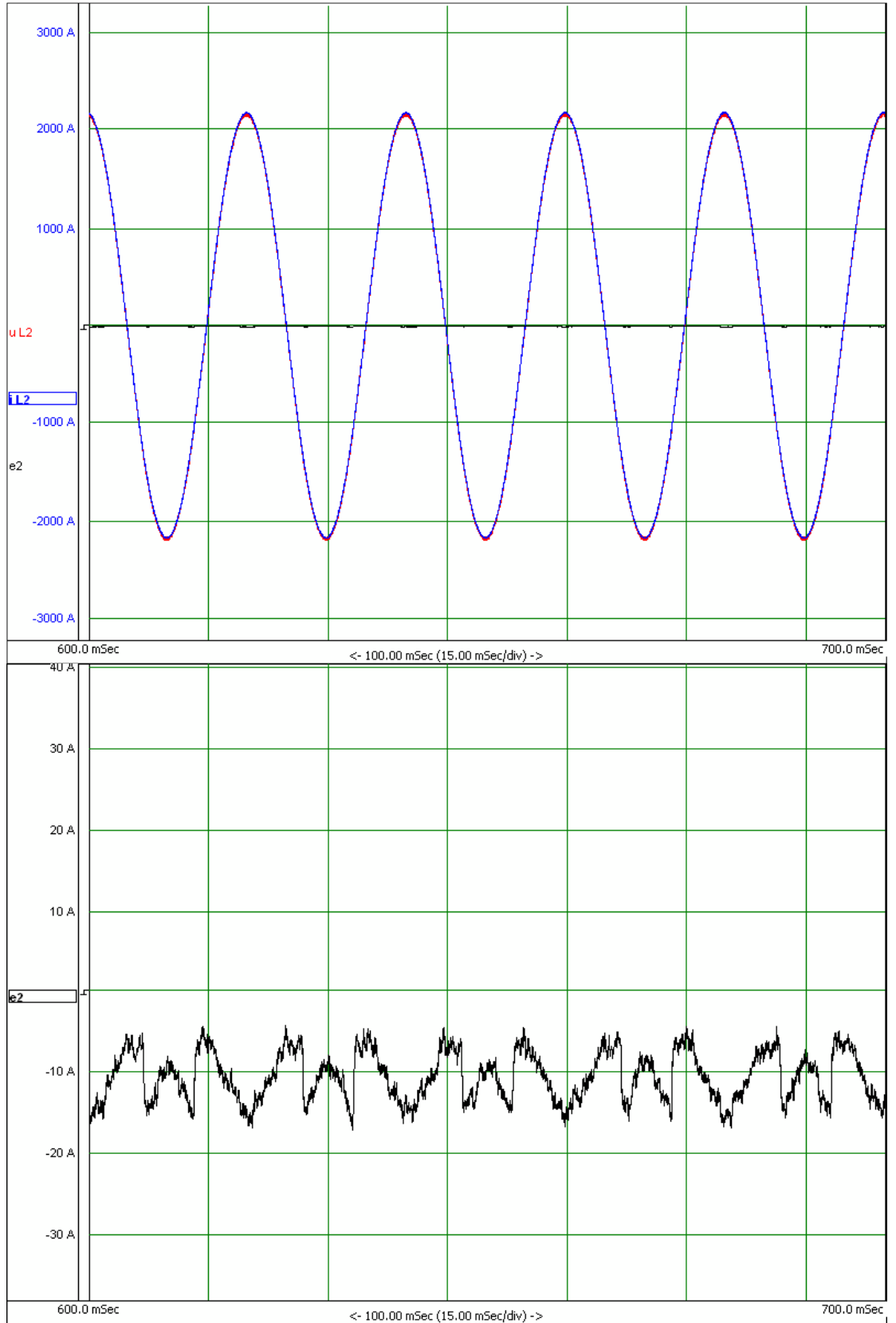
Şekil A.1.26 9.Test L2 Fazı Eğrileri



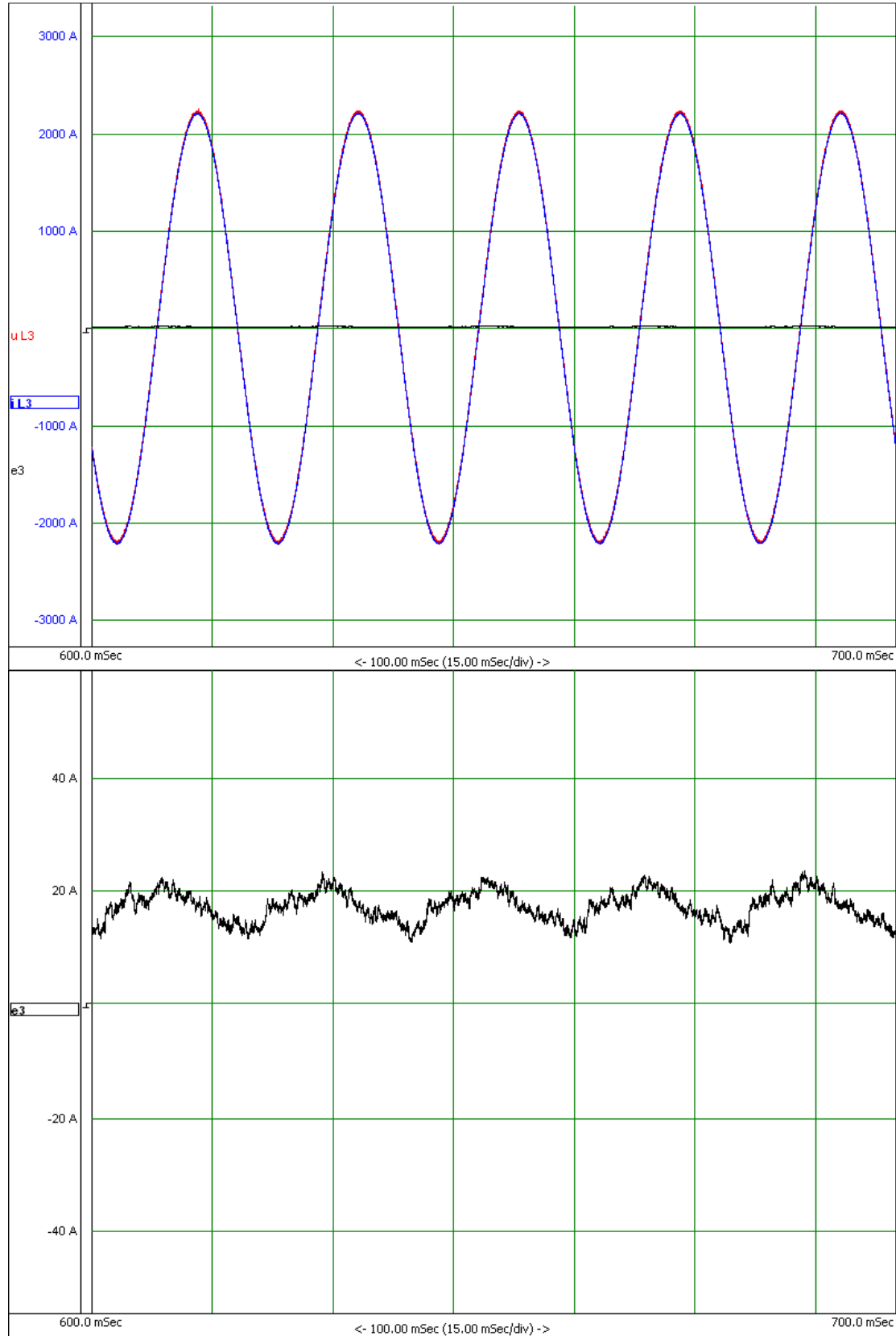
Şekil A.1.27 9.Test L3 Fazı Eğrileri



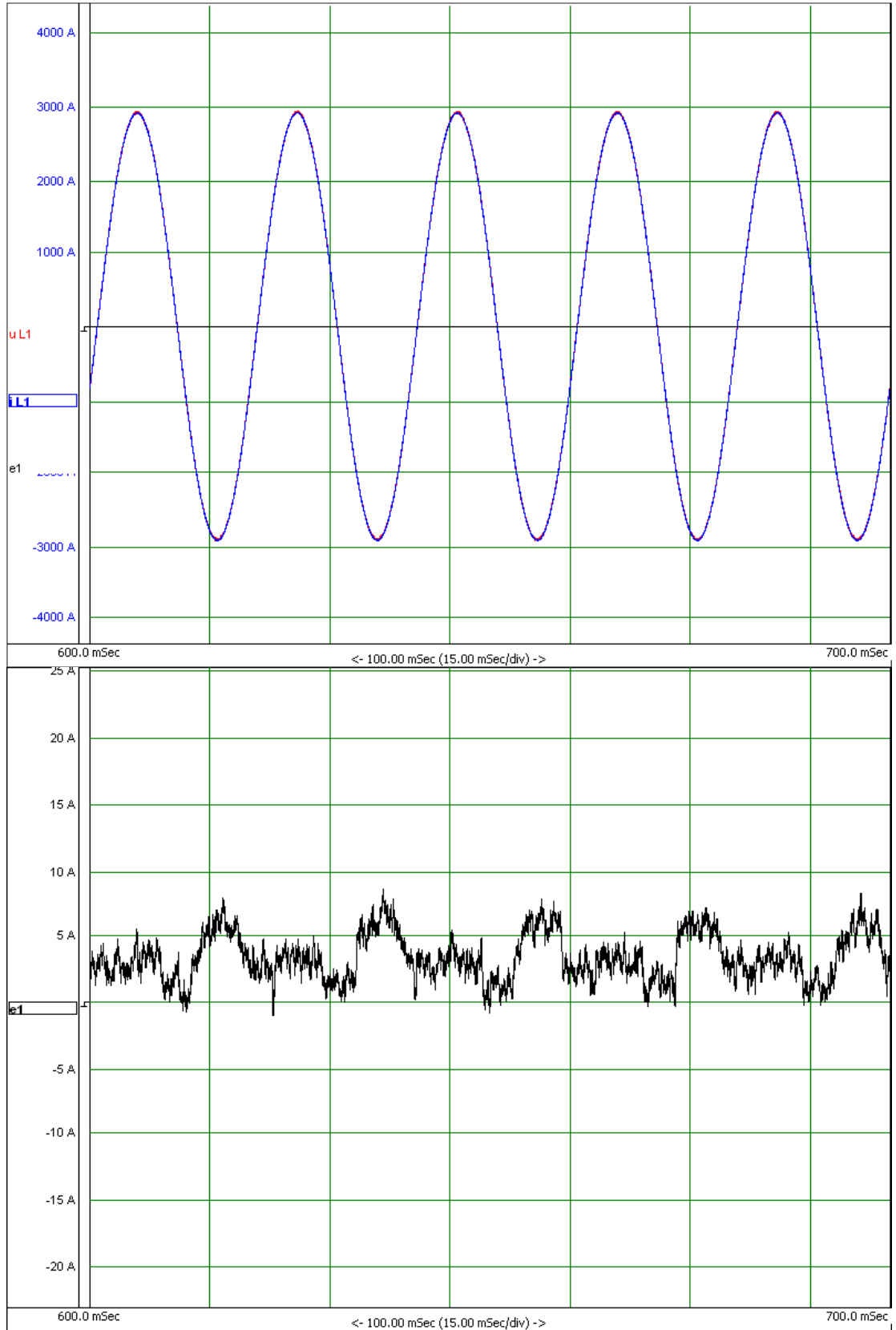
Şekil A.1.28 10.Test L1 Fazı Eğrileri



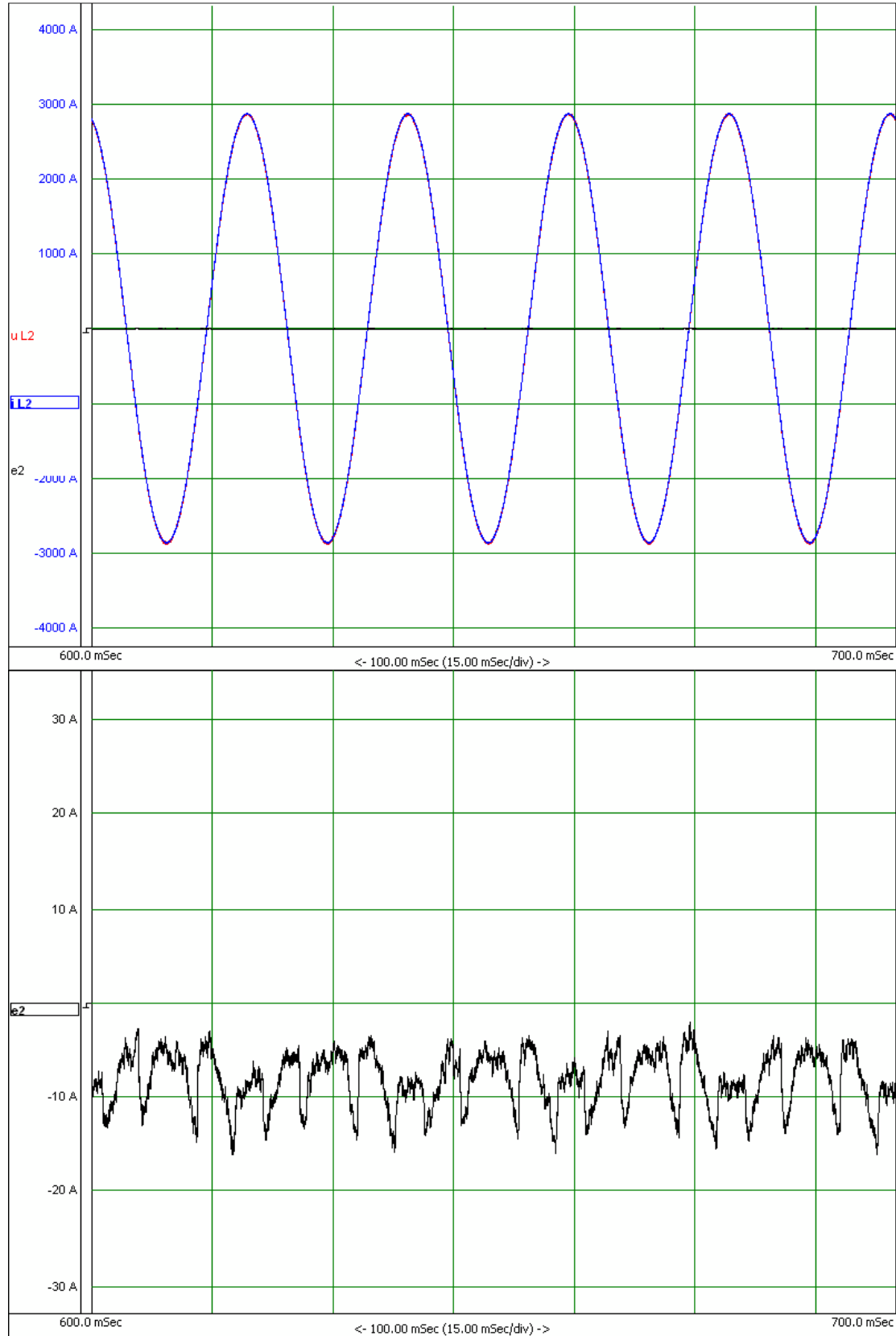
Şekil A.1.29 10.Test L2 Fazı Eğrileri



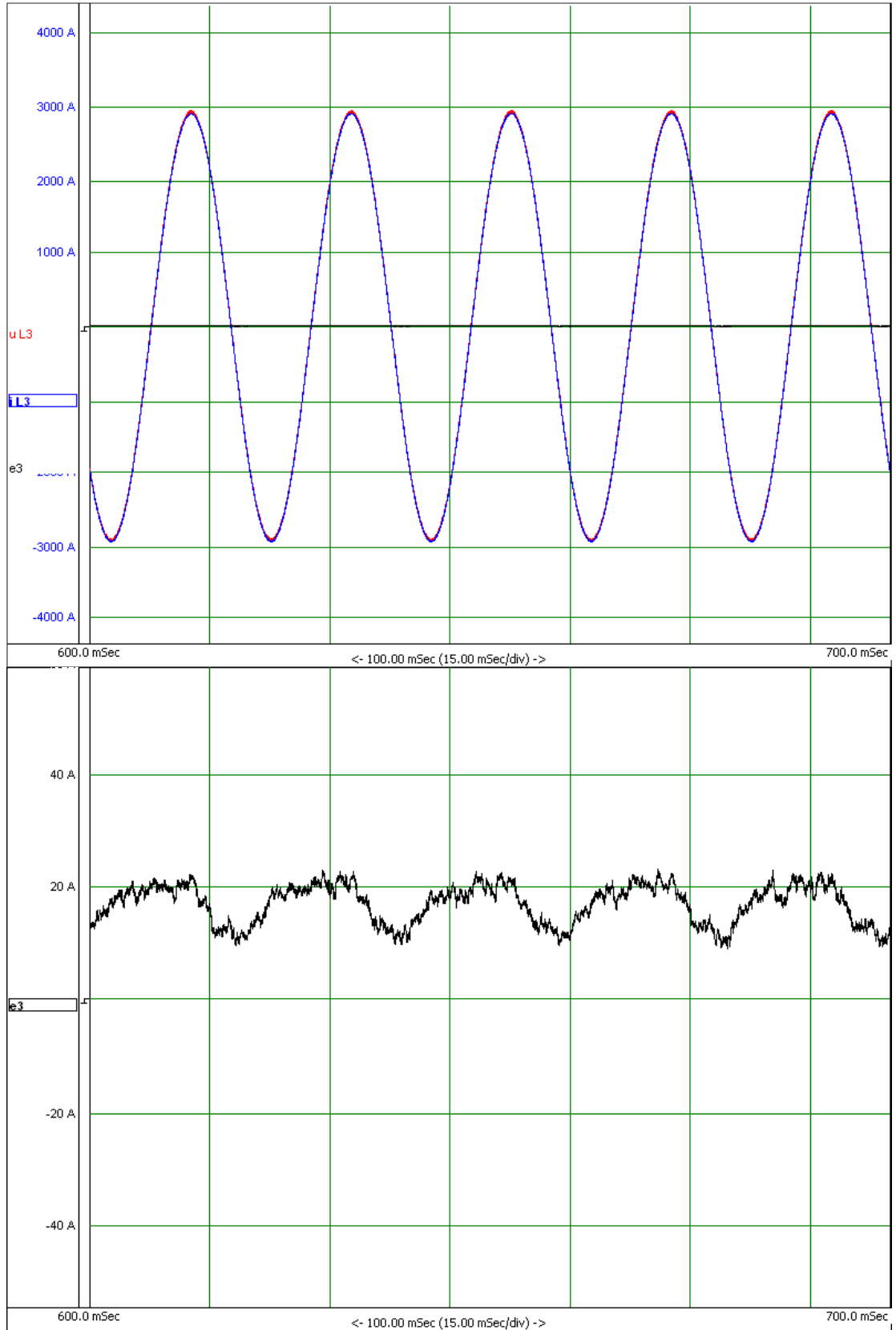
Şekil A.1.30 10.Test L3 Fazı Eğrileri



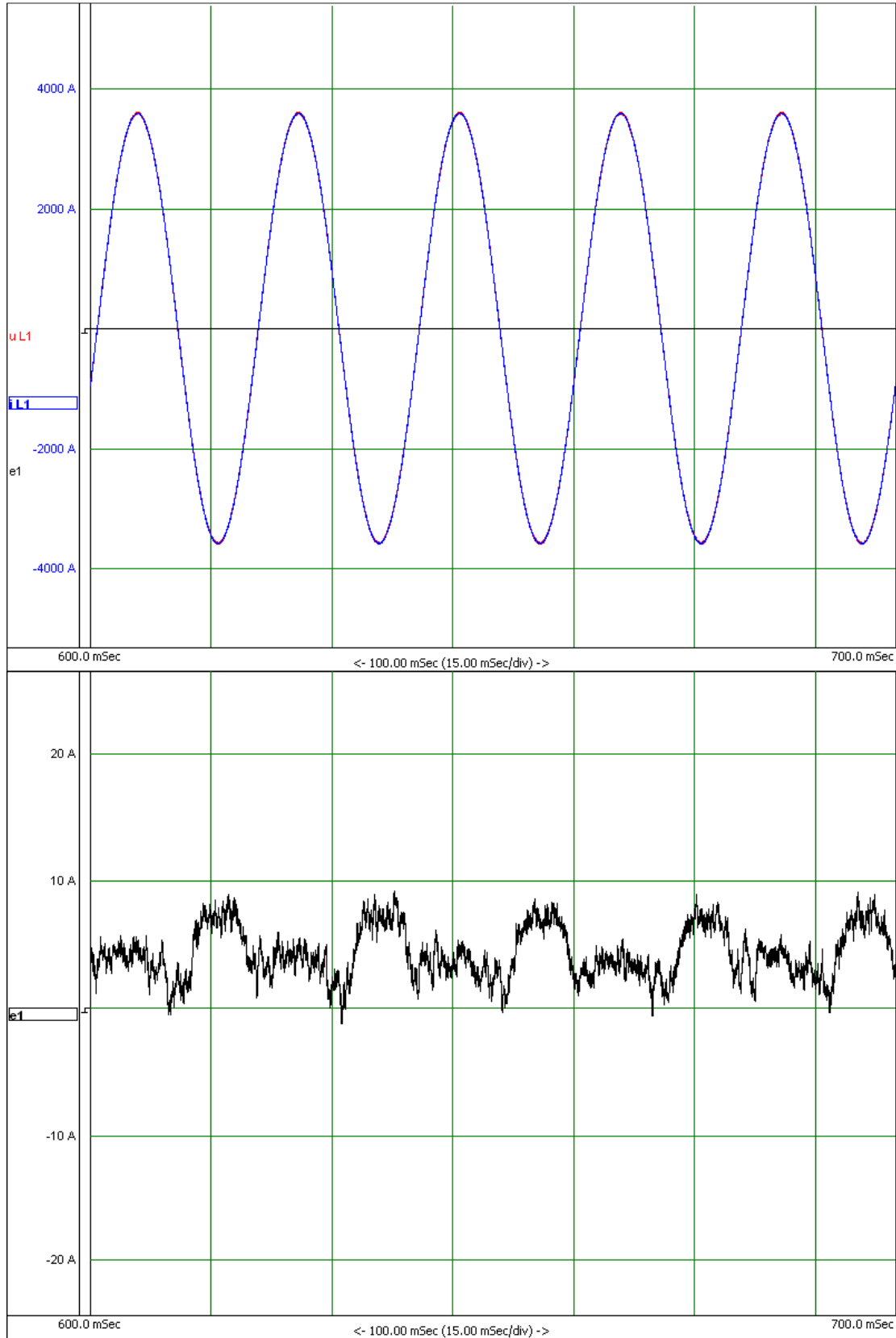
Şekil A.1.31 11.Test L1 Fazı Eğrileri



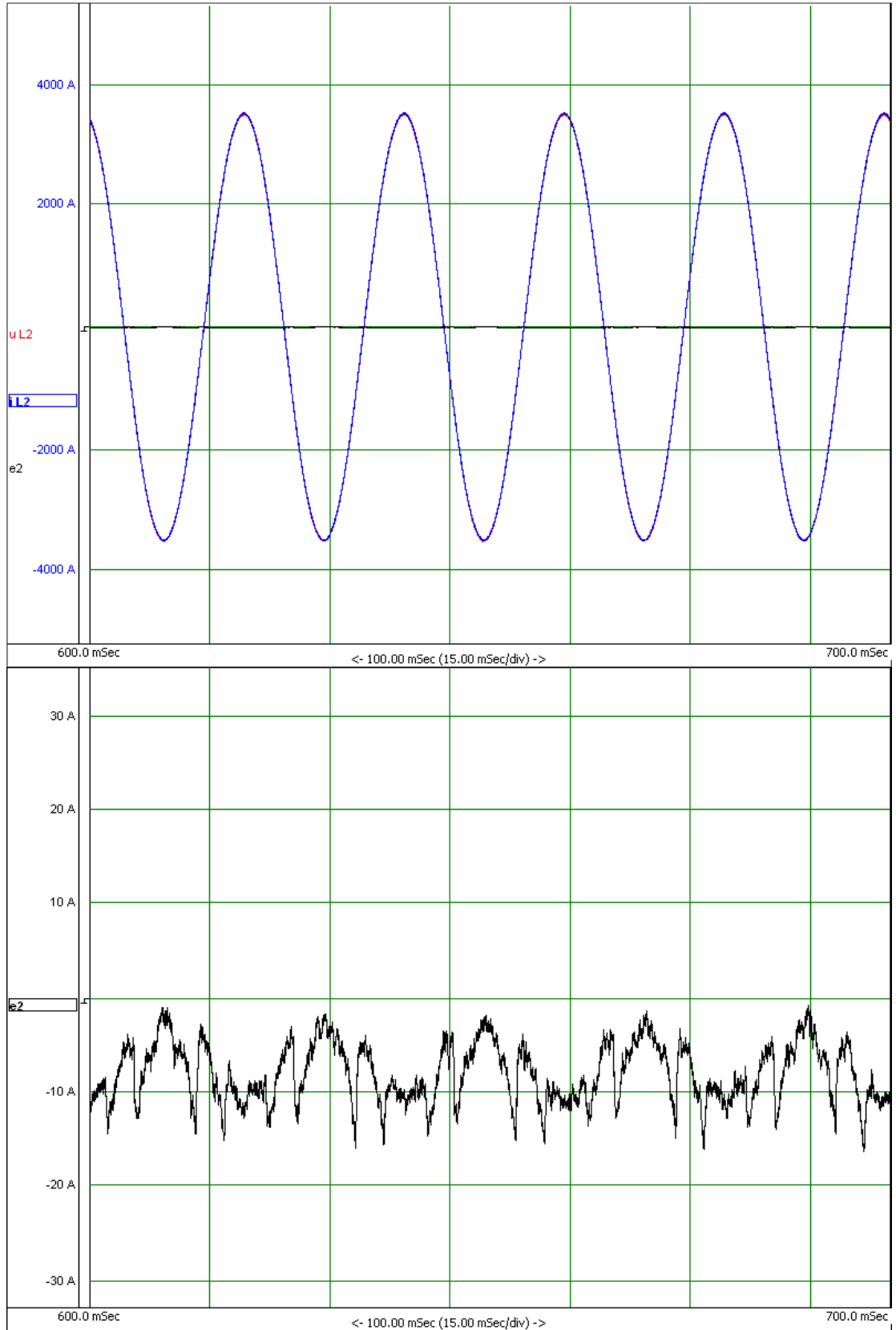
Şekil A.1.32 11.Test L2 Fazı Eğrileri



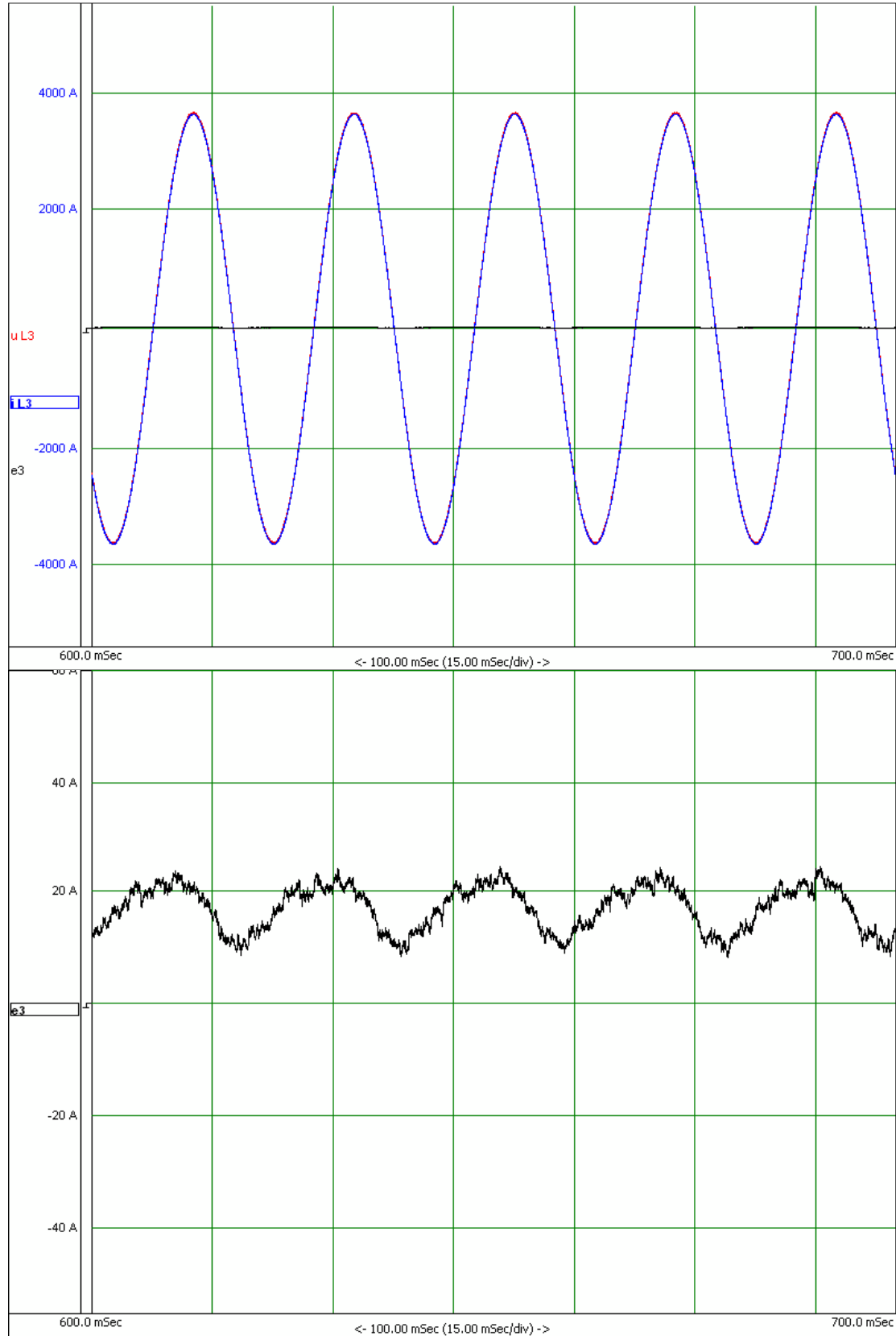
Şekil A.1.33 11.Test L3 Fazı Eğrileri



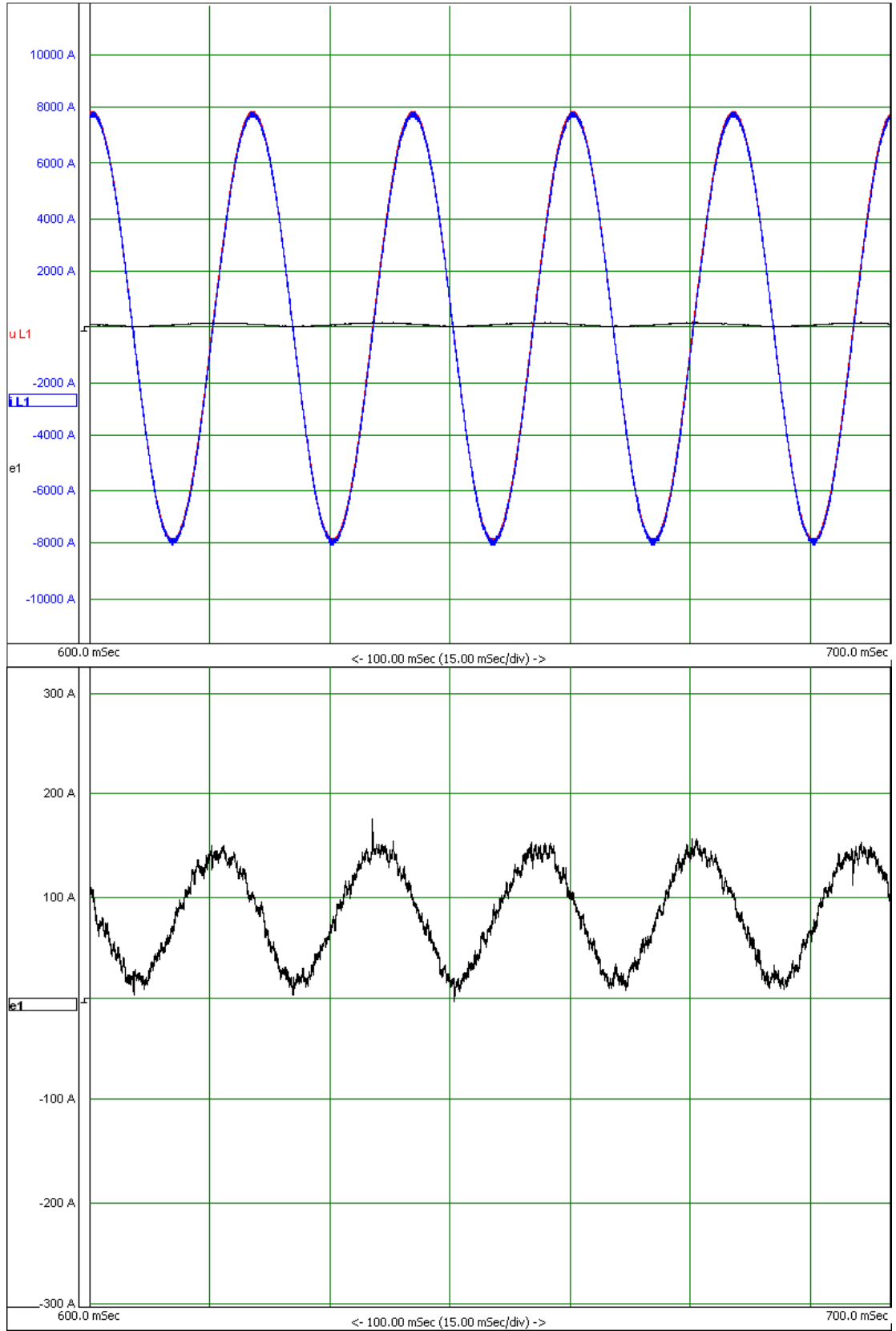
Şekil A.1.34 12.Test L1 Fazı Eğrileri



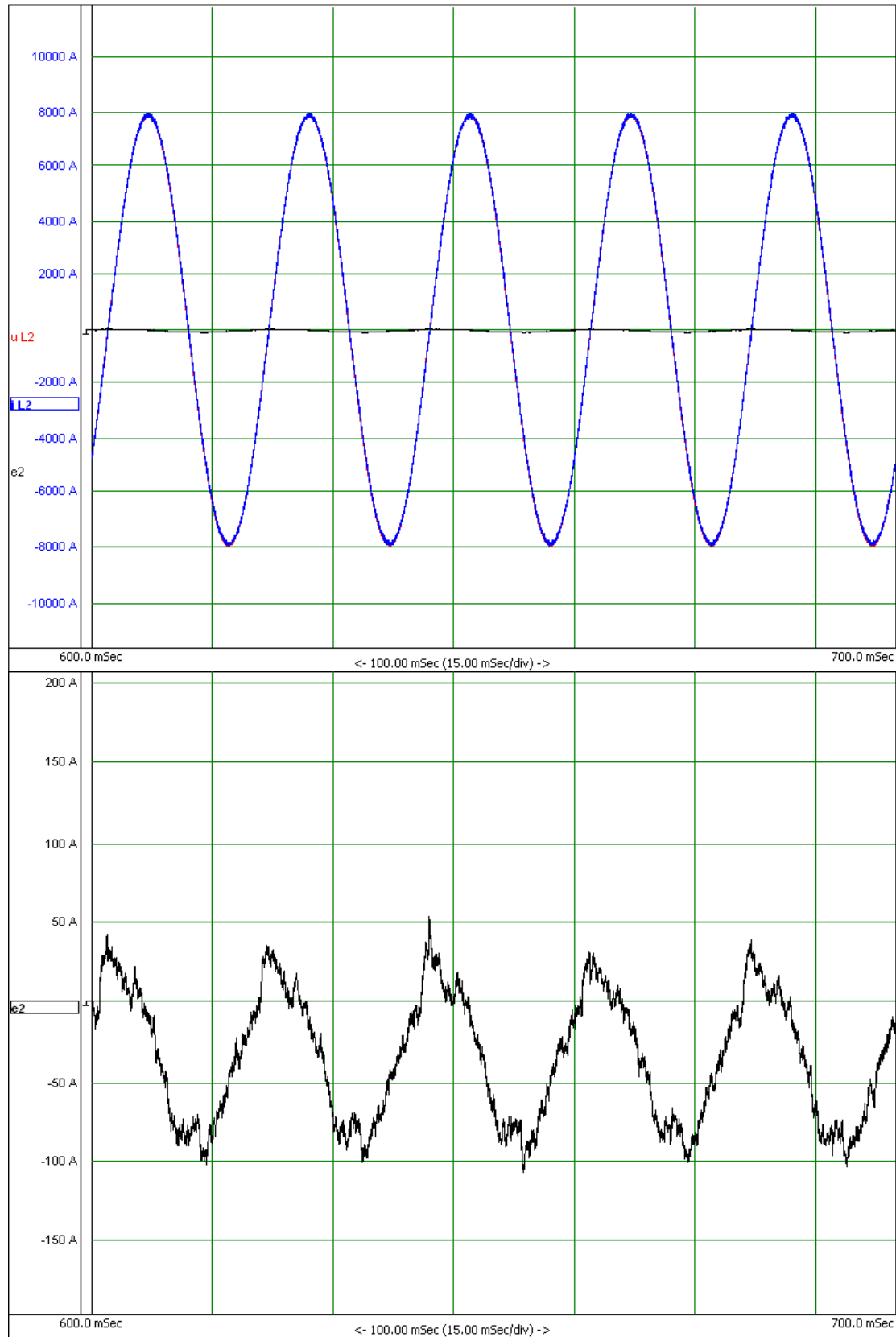
Şekil A.1.35 12.Test L2 Fazı Eğrileri



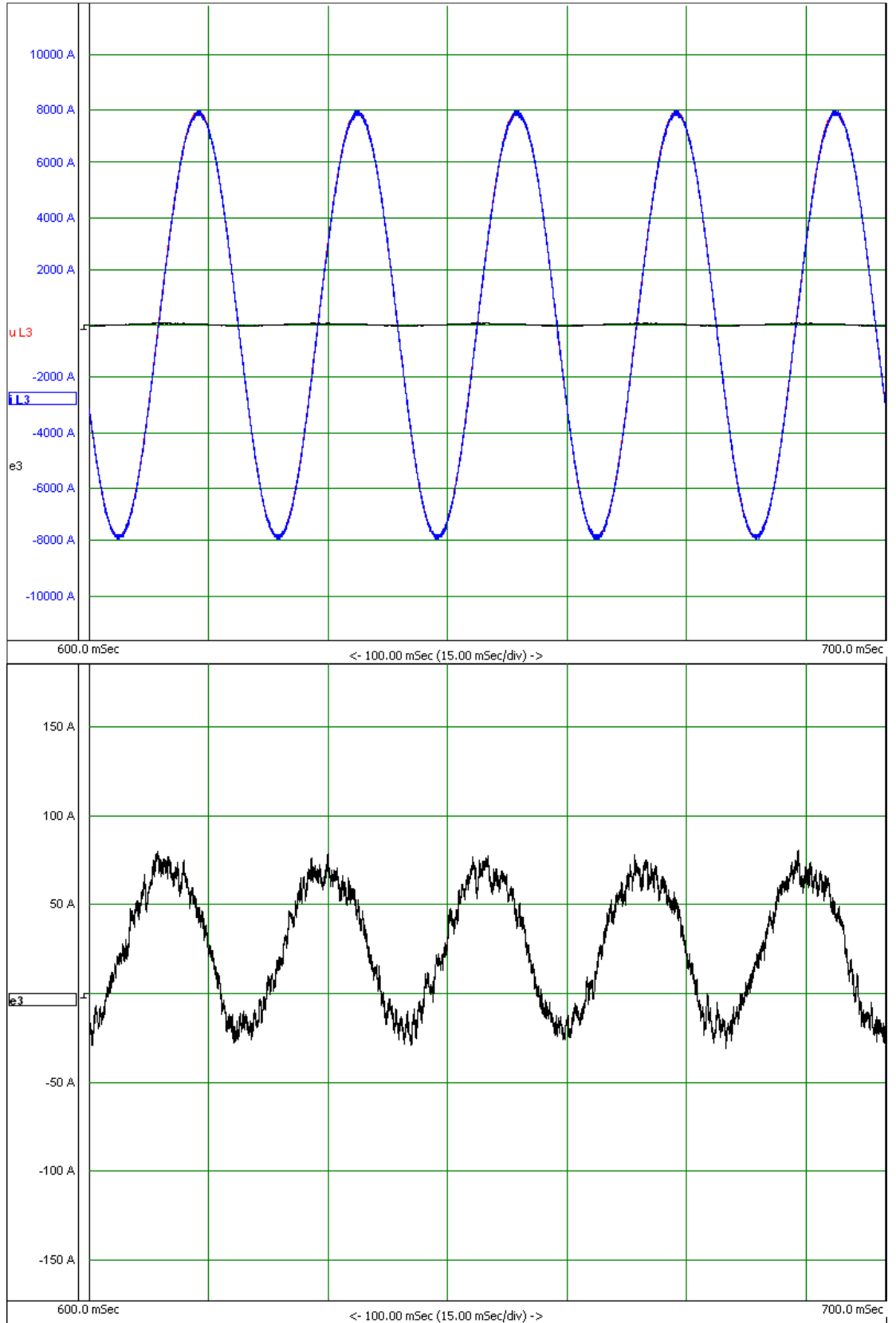
Şekil A.1.36 12.Test L3 Fazı Eğrileri



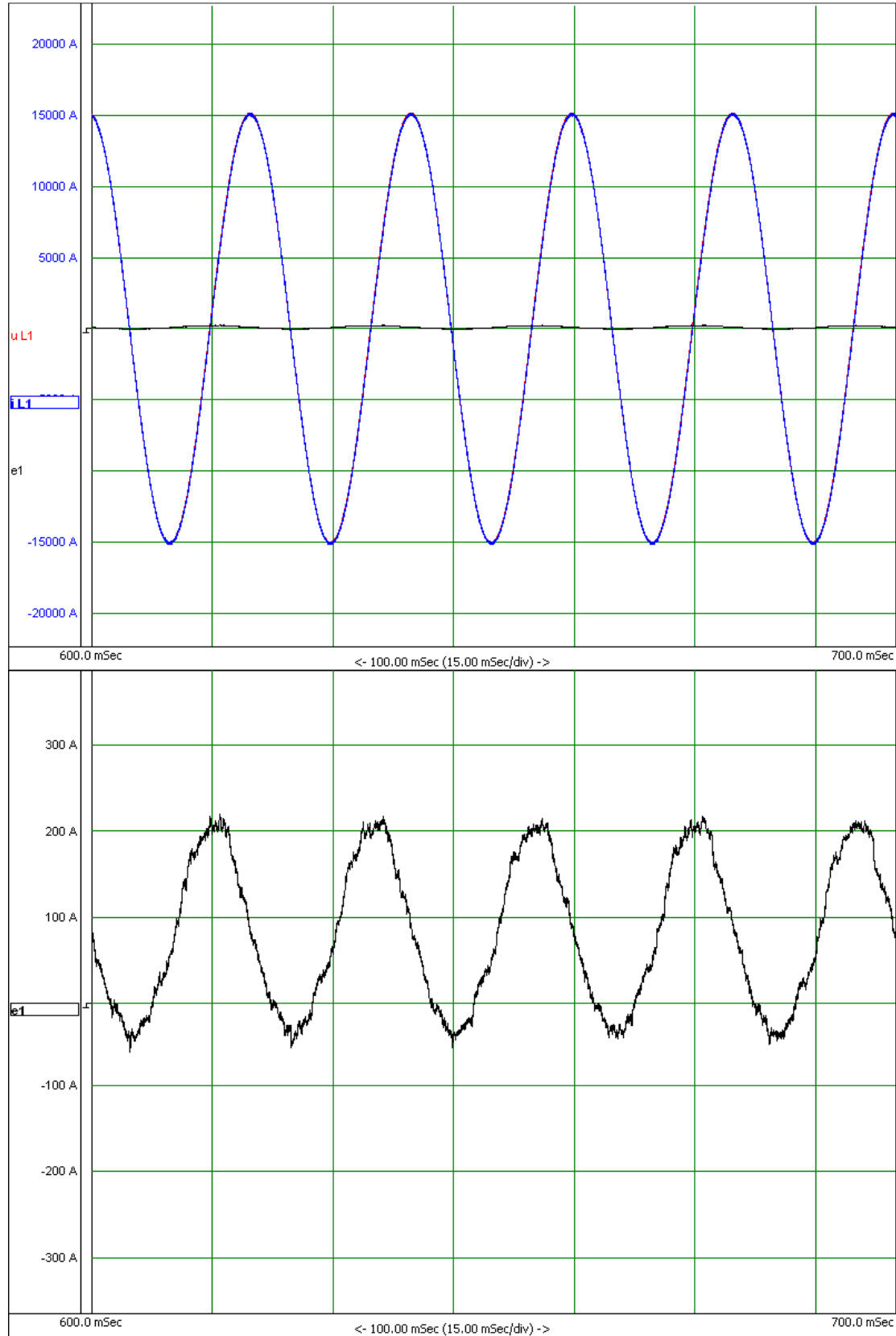
Şekil A.1.37 13.Test L1 Fazı Eğrileri



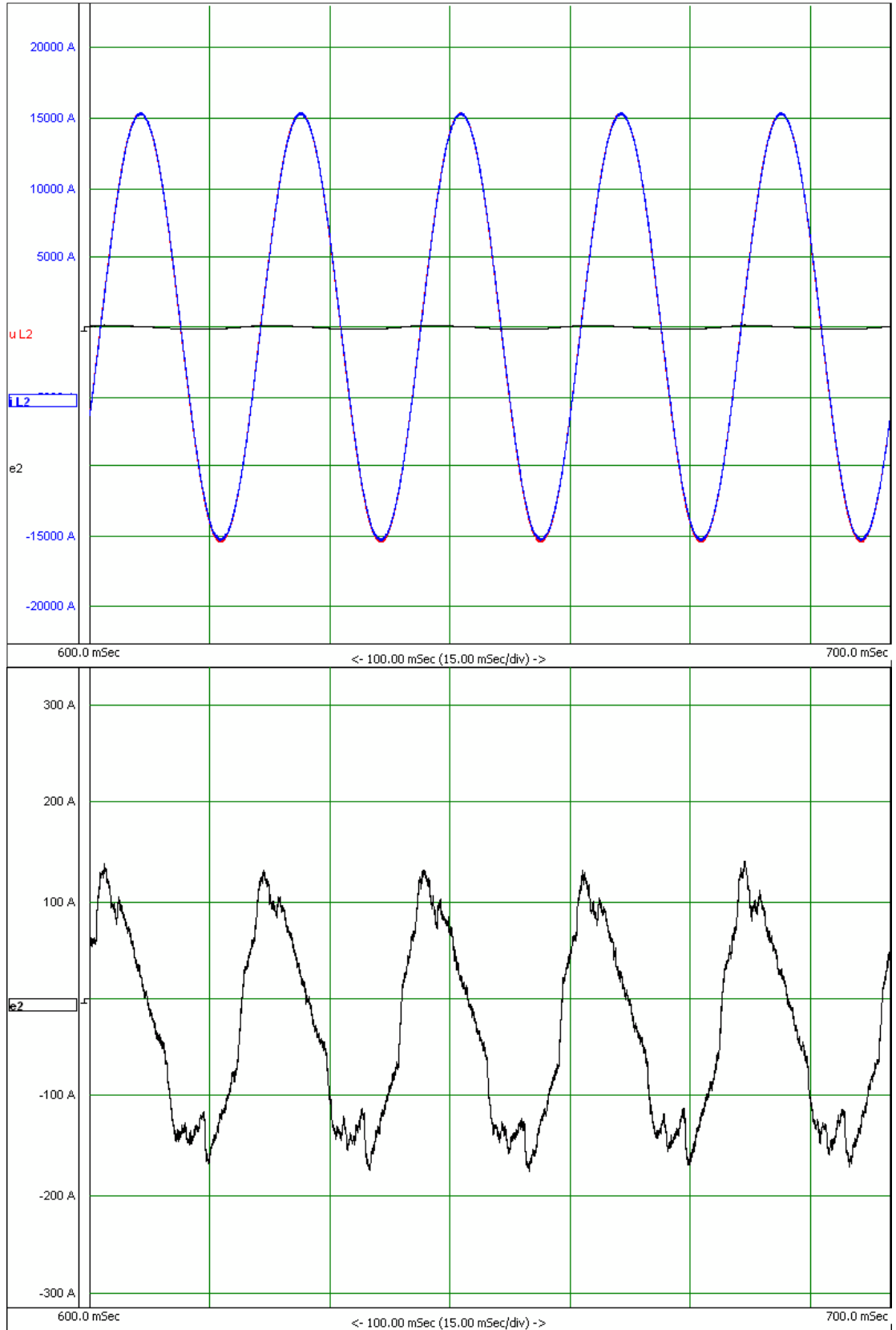
Şekil A.1.38 13.Test L2 Fazı Eğrileri



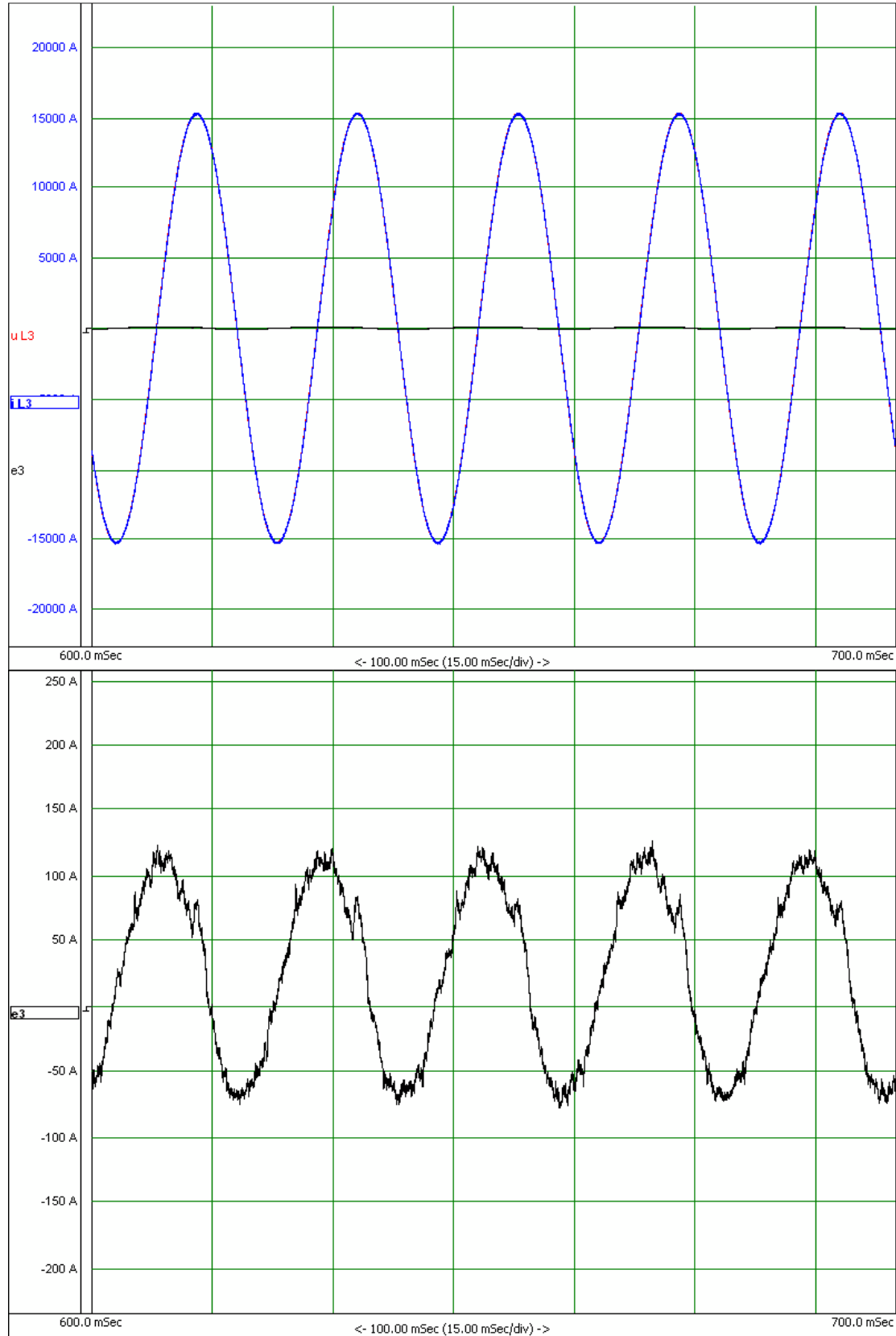
Şekil A.1.39 13.Test L3 Fazı Eğrileri



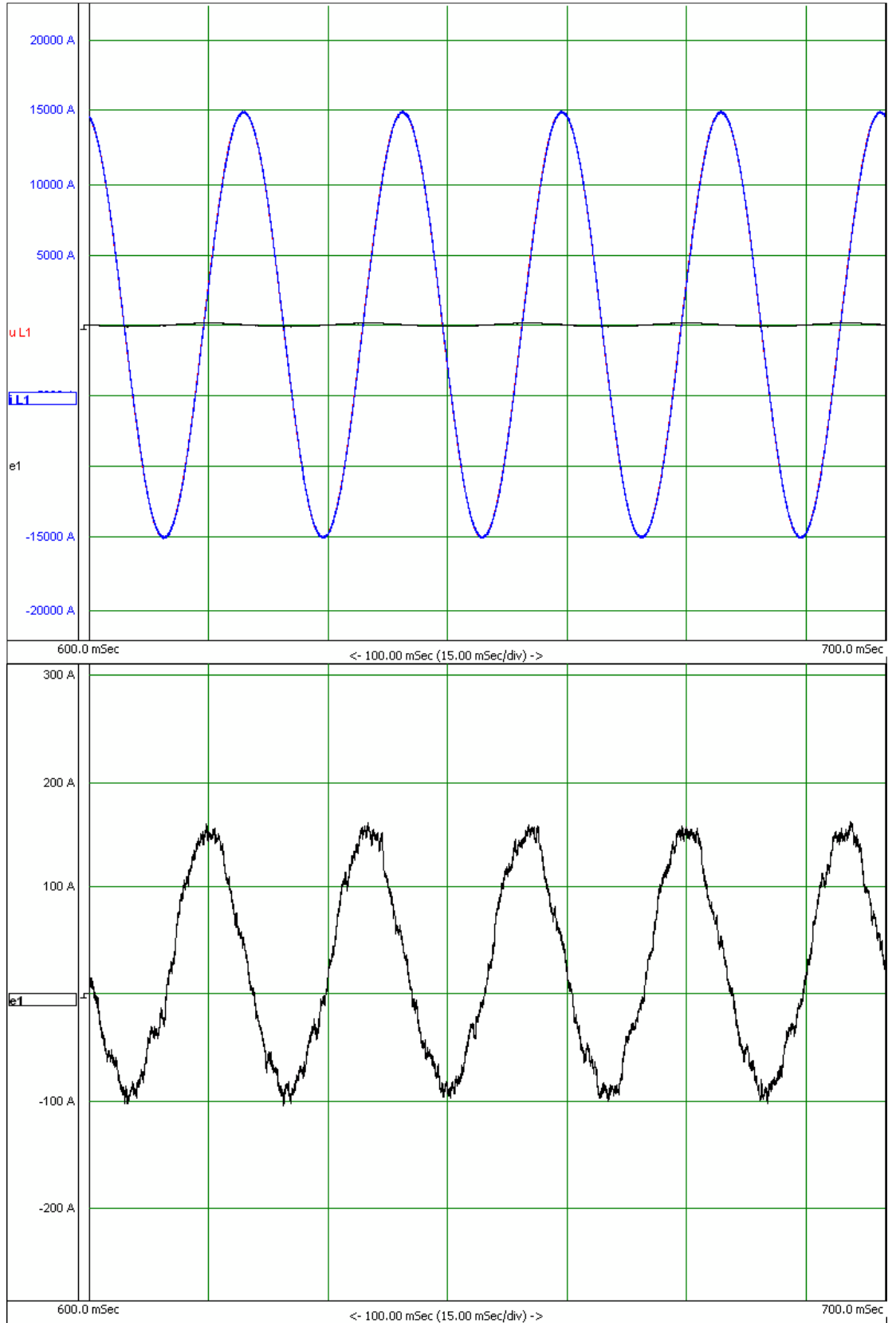
Şekil A.1.40 14.Test L1 Fazı Eğrileri



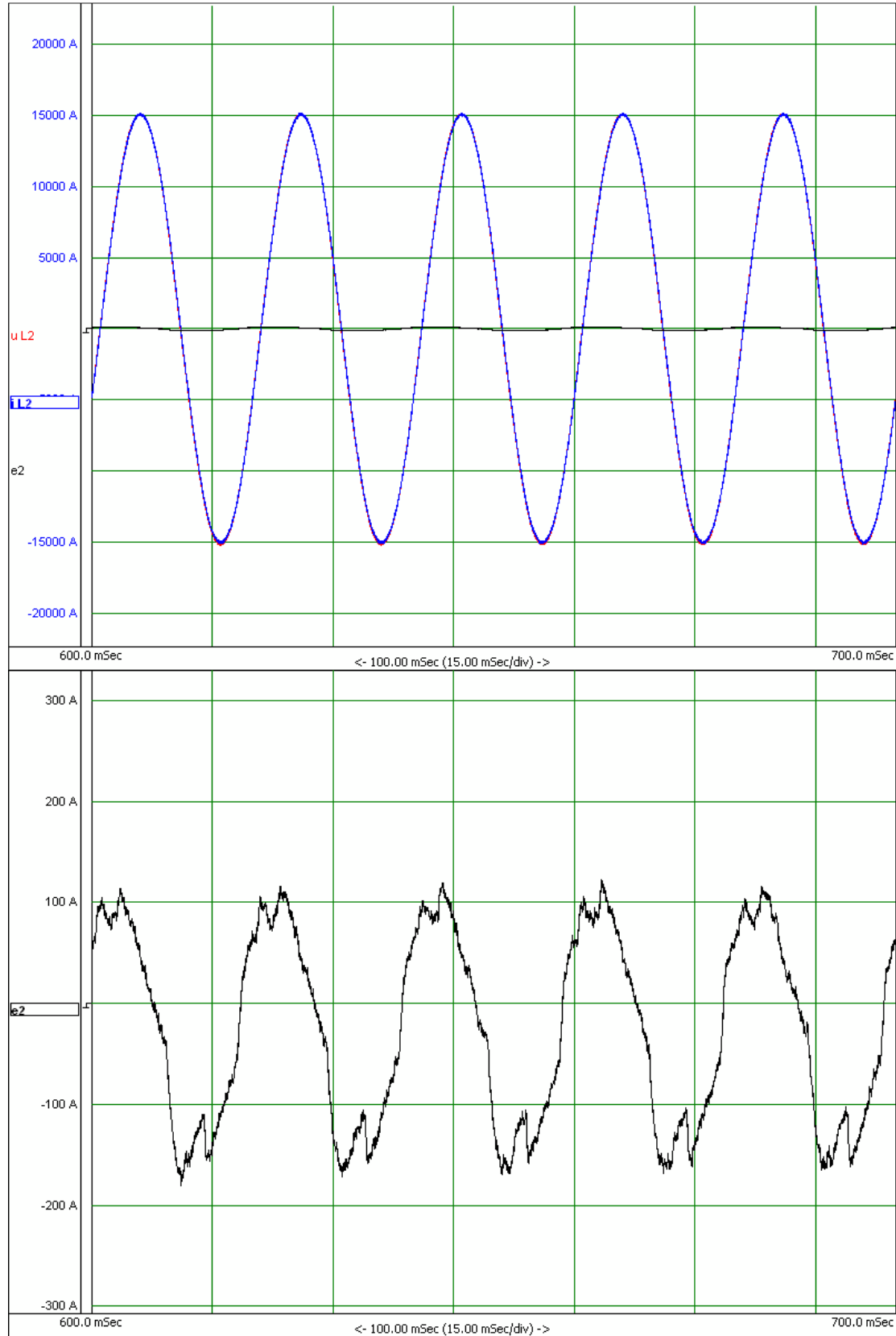
Şekil A.1.41 14.Test L2 Fazı Eğrileri



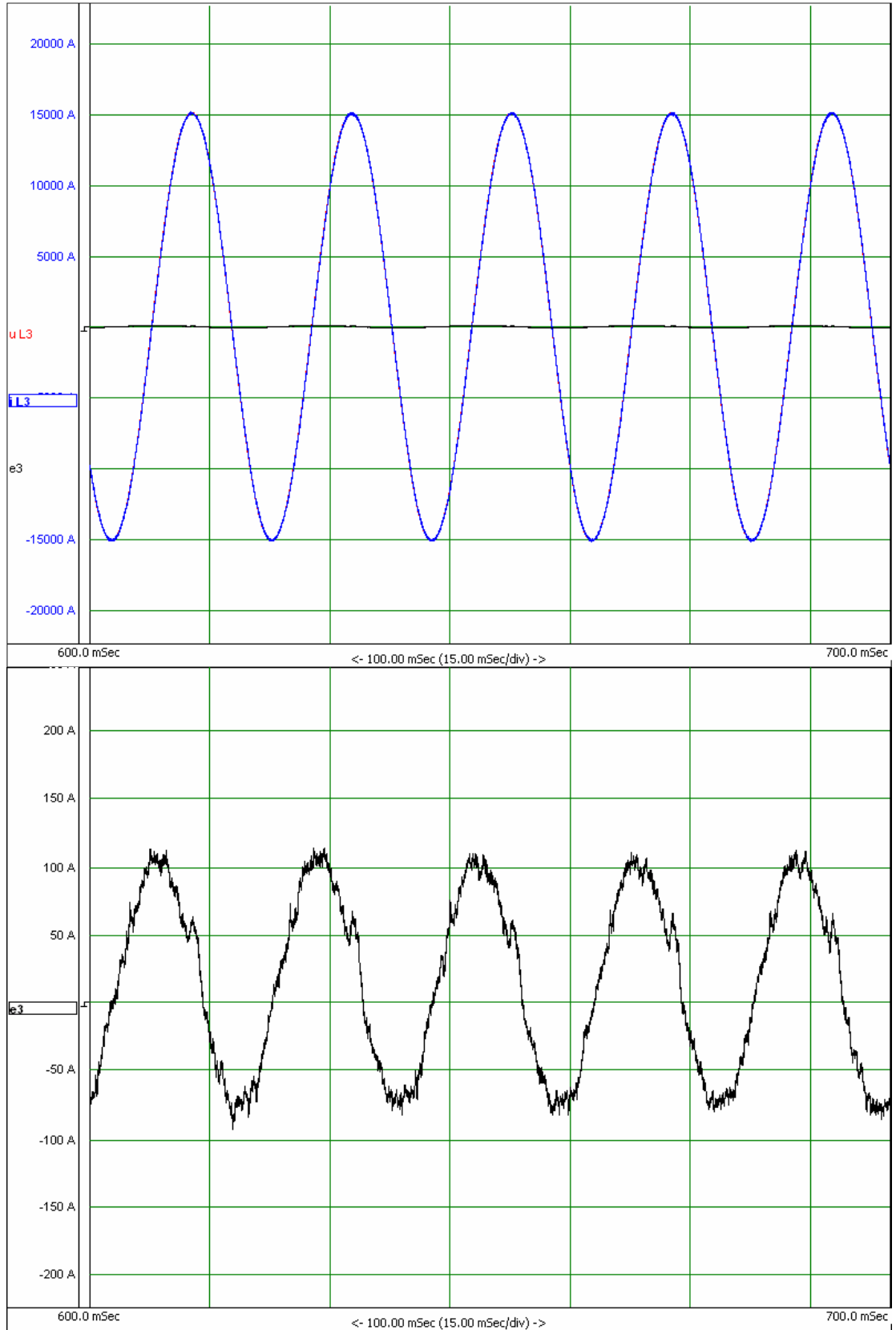
Şekil A.1.42 14.Test L3 Fazı Eğrileri



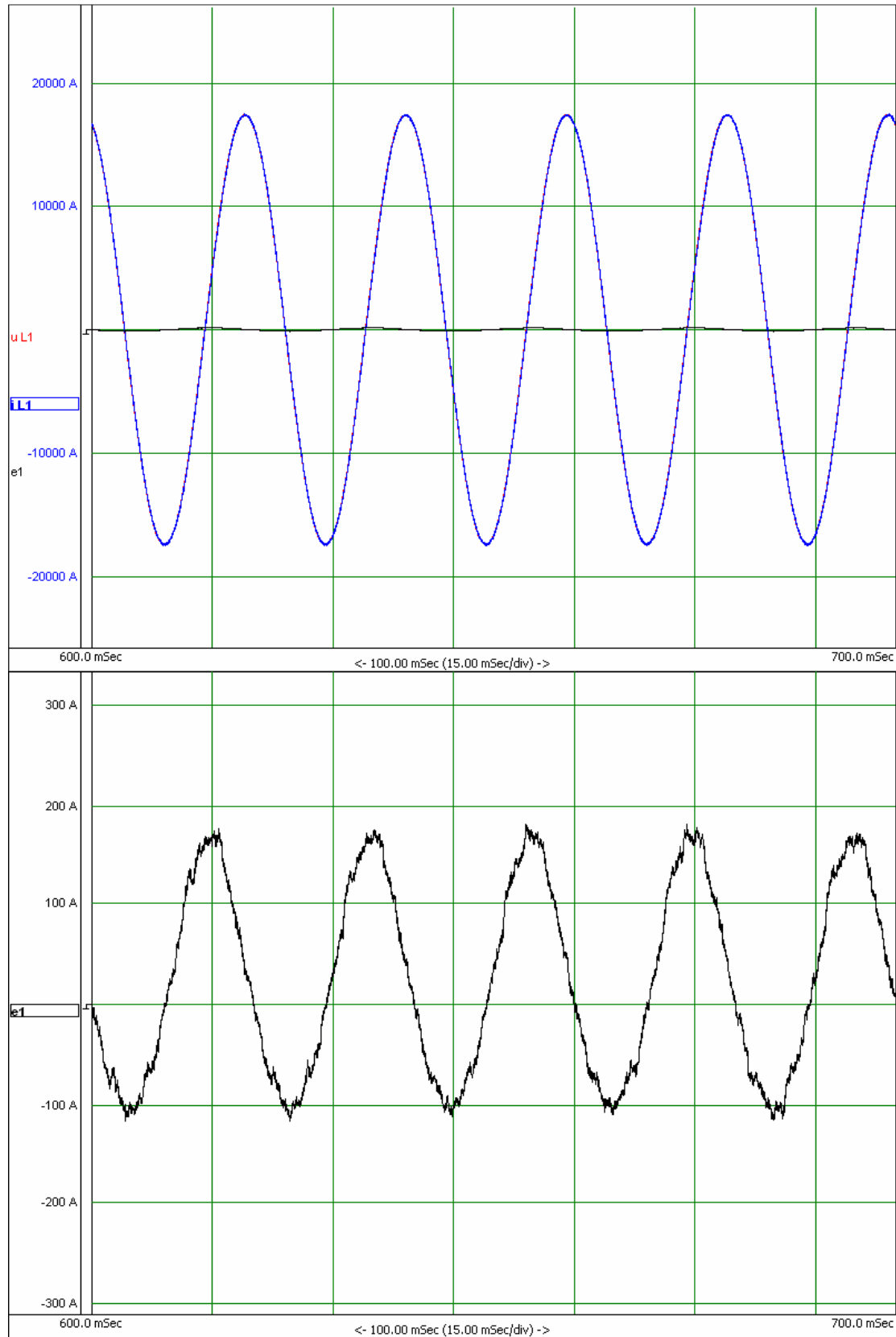
Şekil A.1.43 15.Test L1 Fazı Eğrileri



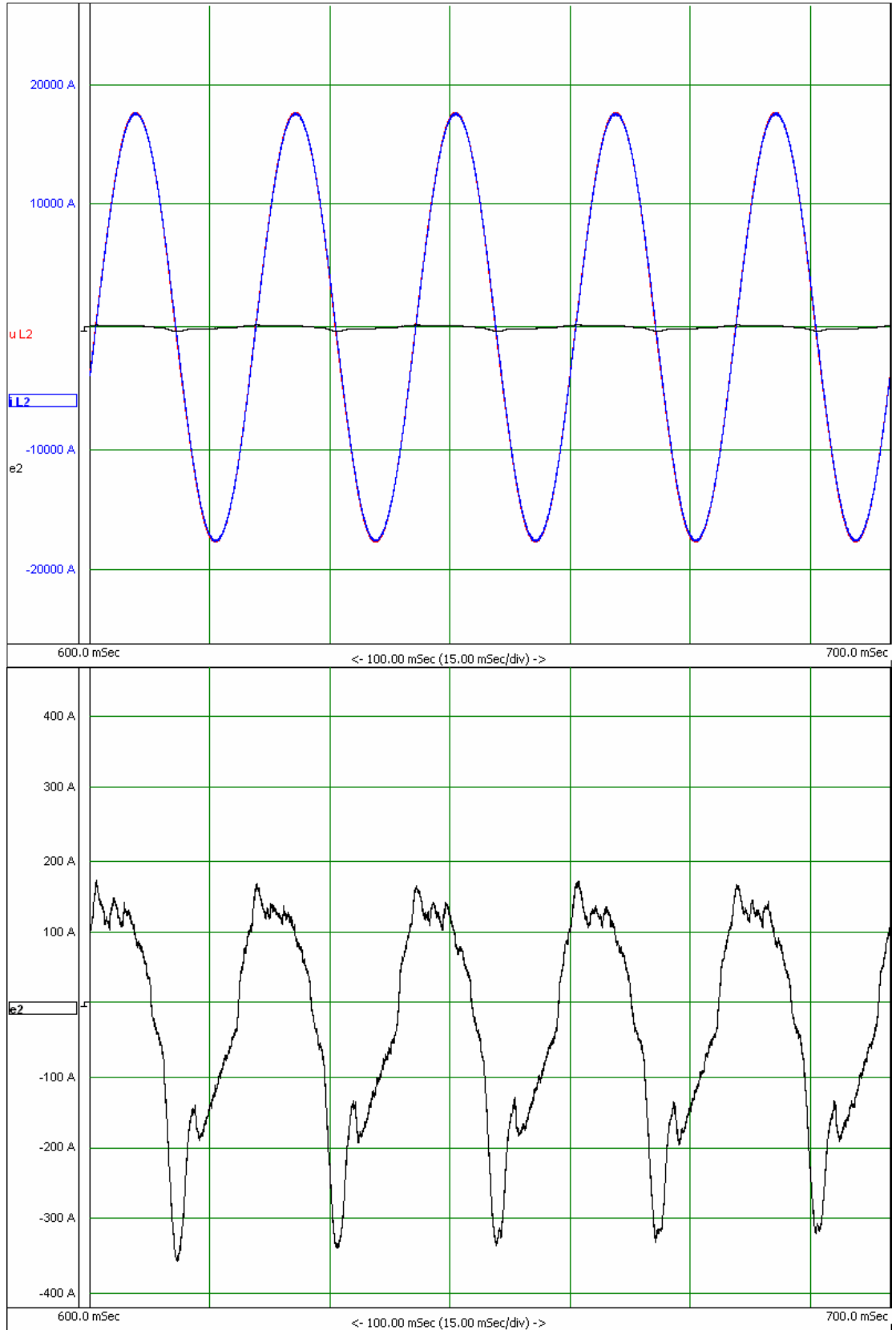
Şekil A.1.44 15.Test L2 Fazı Eğrileri



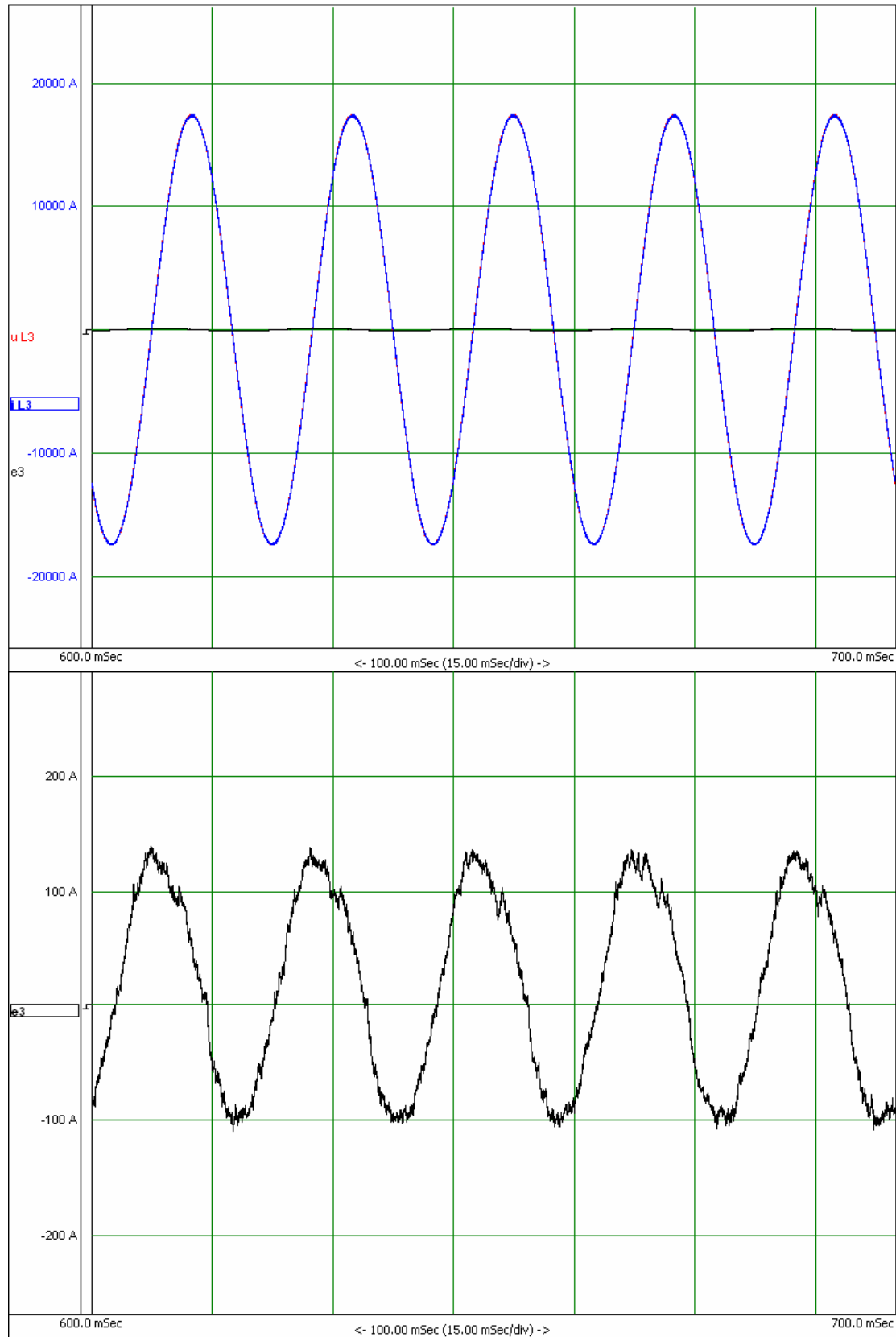
Şekil A.1.45 15.Test L3 Fazı Eğrileri



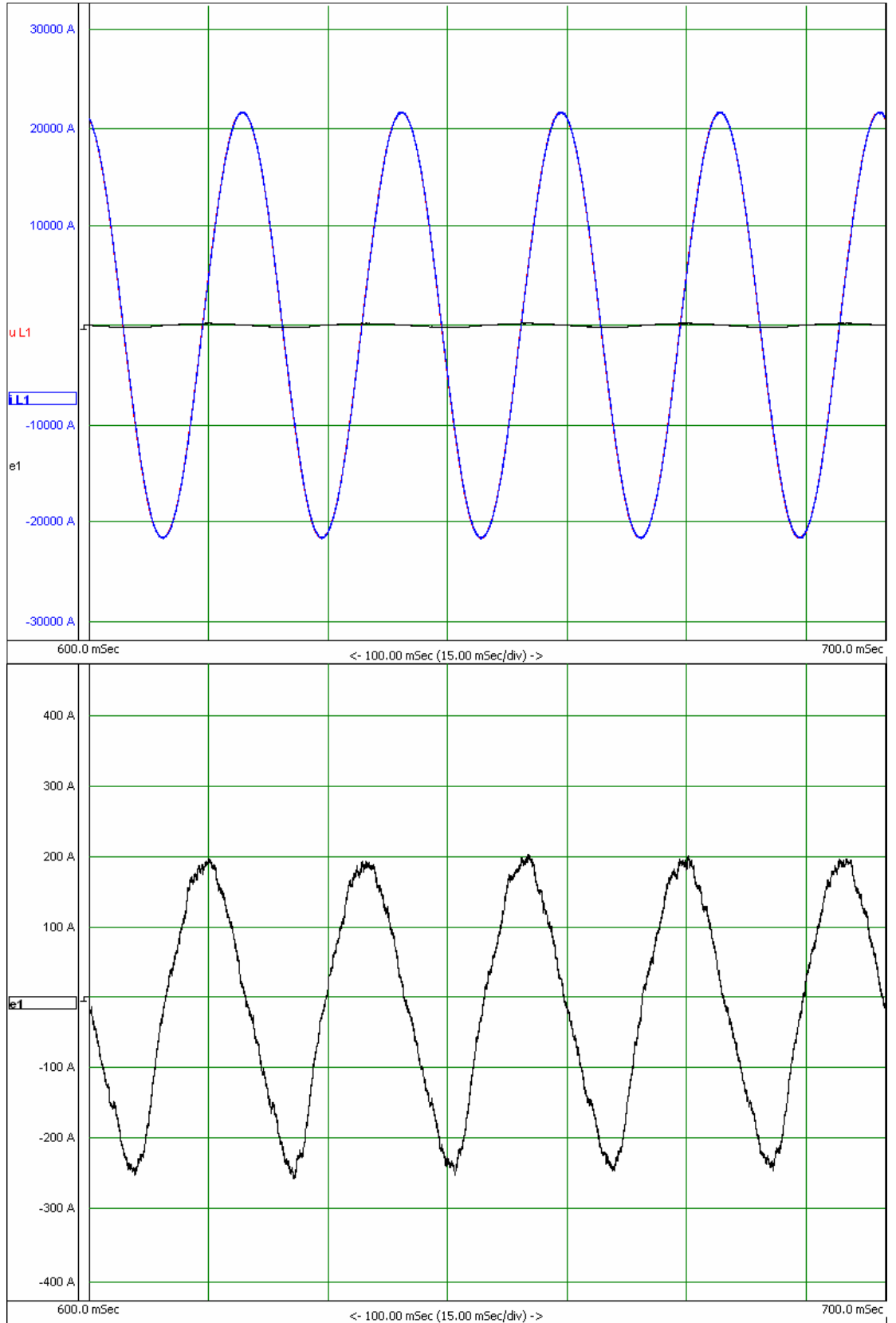
Şekil A.1.46 16.Test L1 Fazı Eğrileri



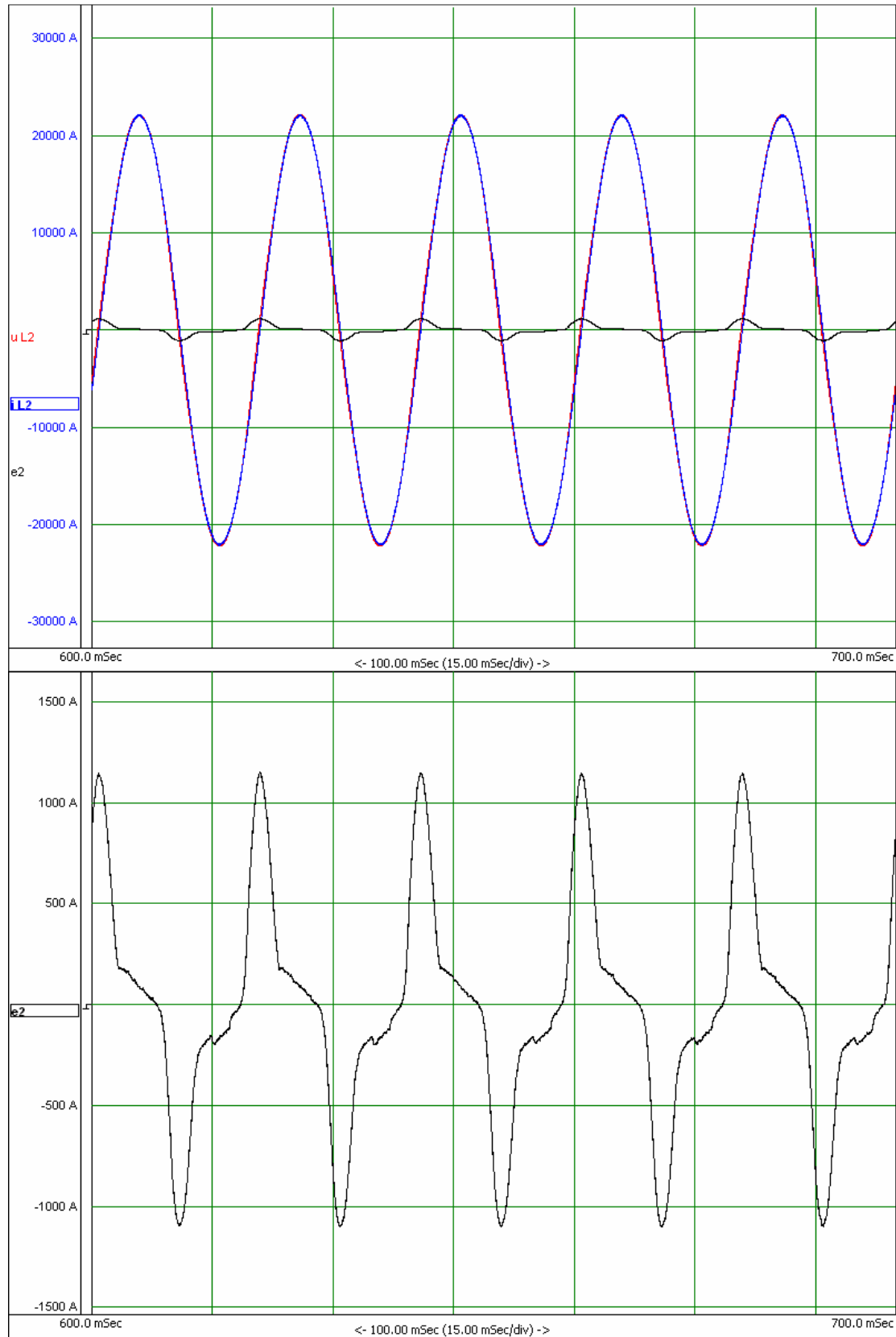
Şekil A.1.47 16.Test L2 Fazı Eğrileri



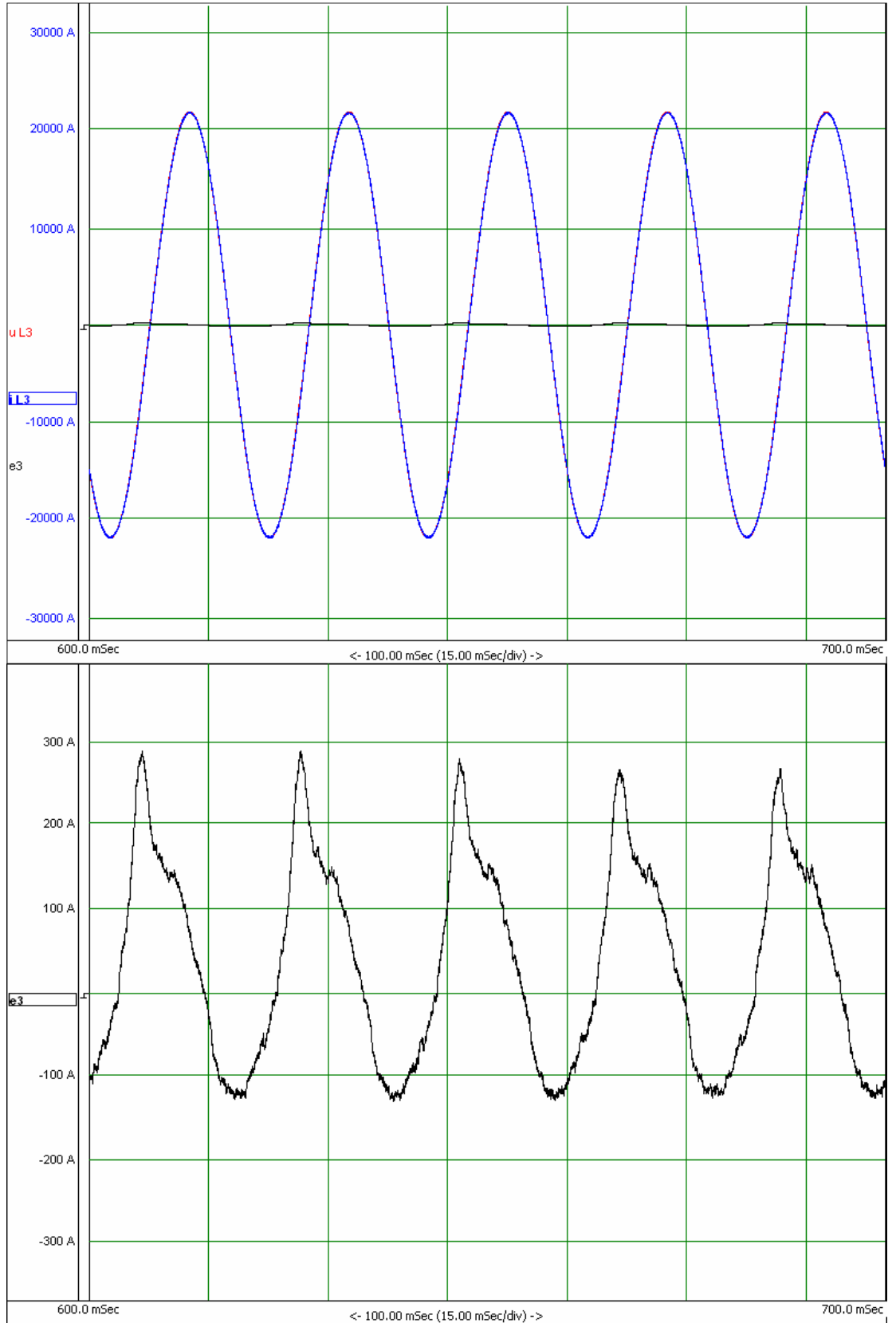
Şekil A.1.48 16.Test L3 Fazı Eğrileri



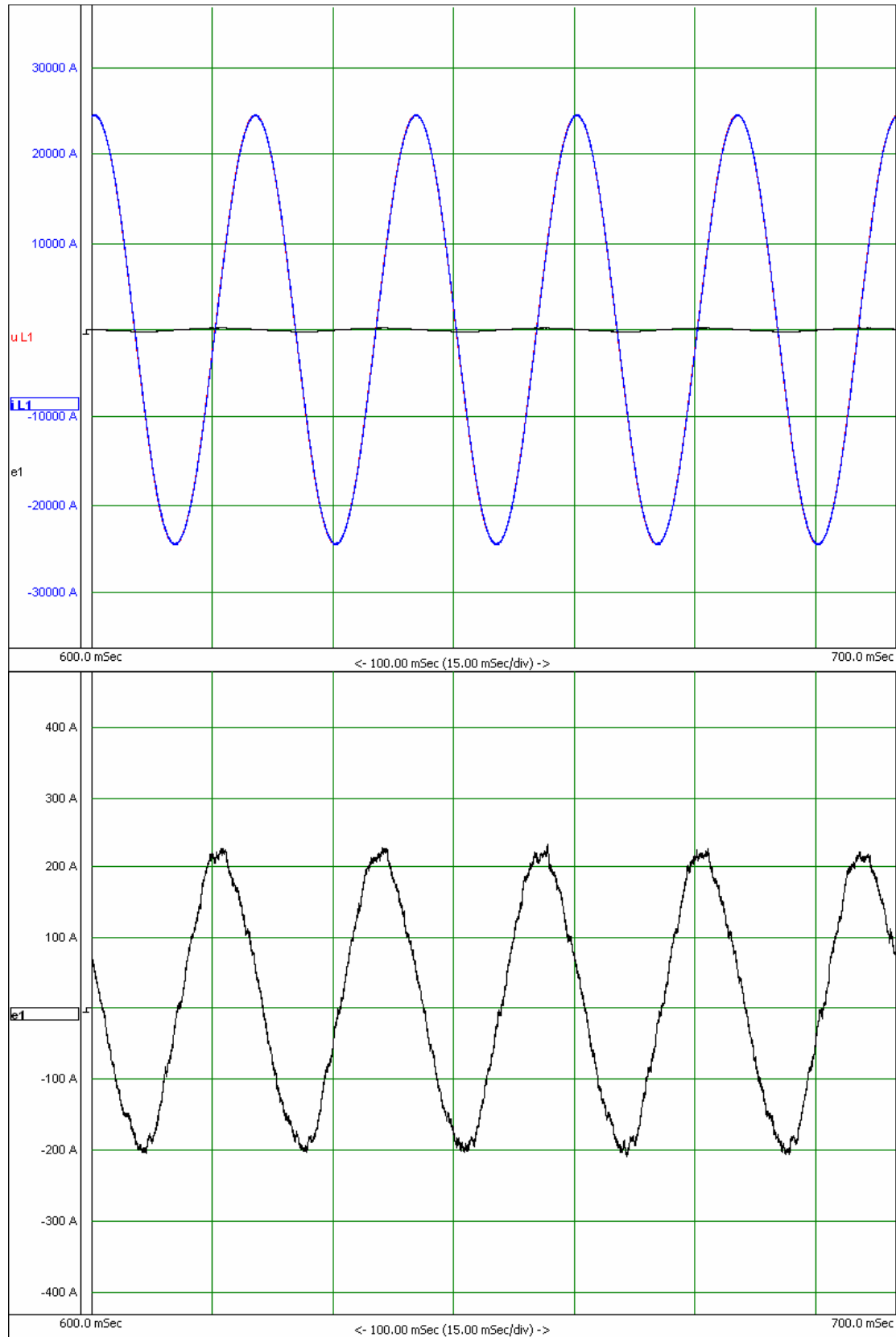
Şekil A.1.49 17.Test L1 Fazı Eğrileri



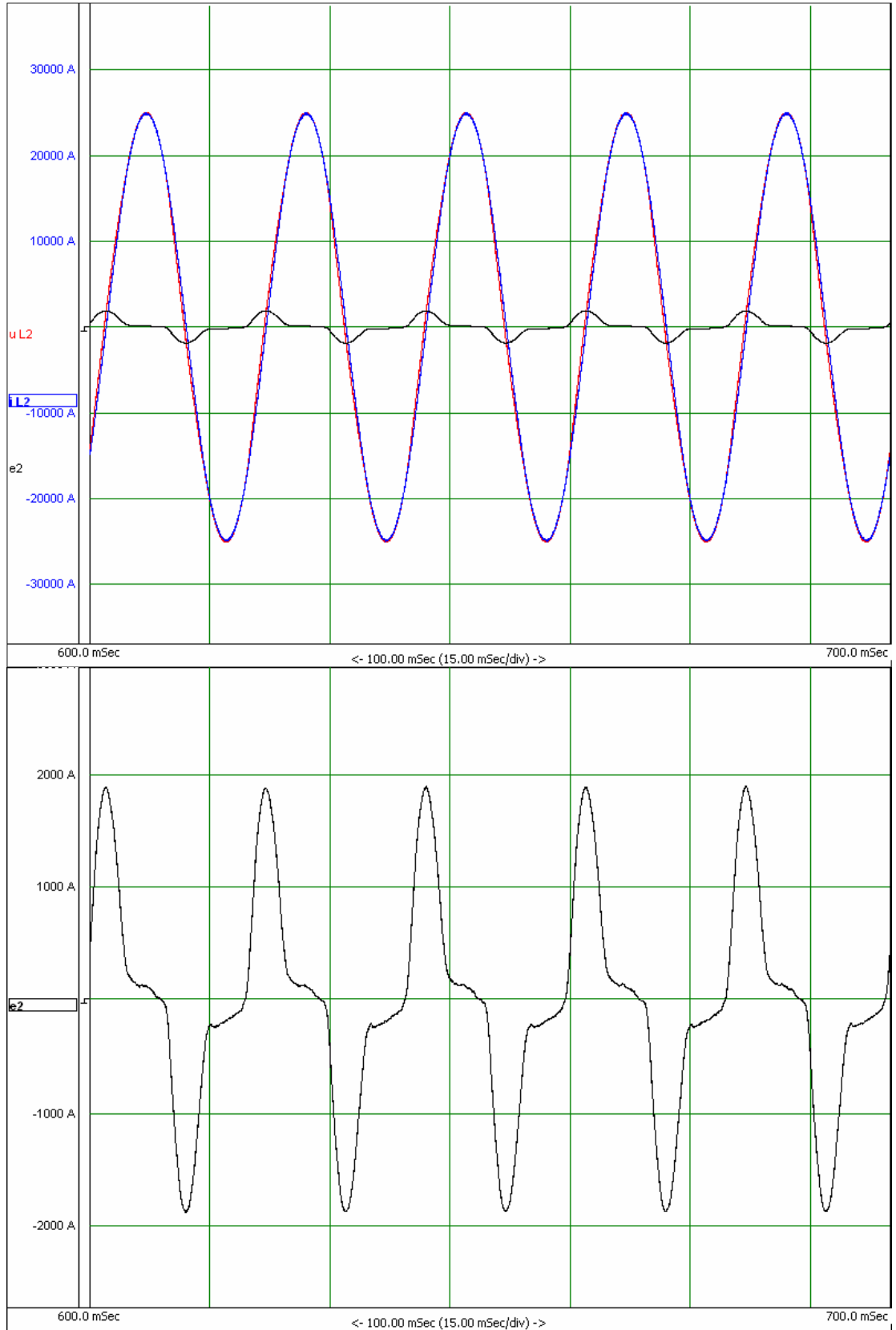
Şekil A.1.50 17.Test L2 Fazı Eğrileri



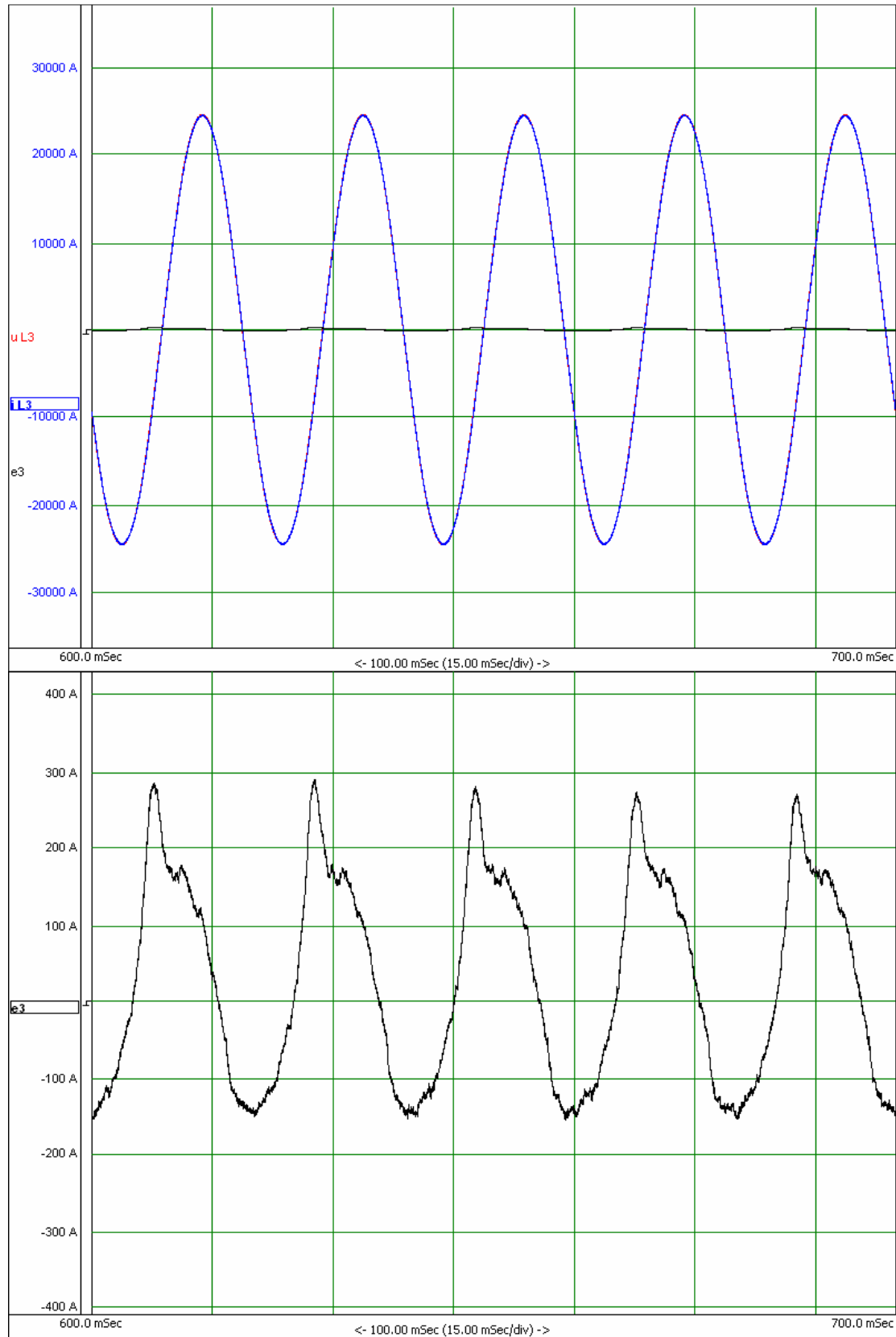
Şekil A.1.51 17.Test L3 Fazı Eğrileri



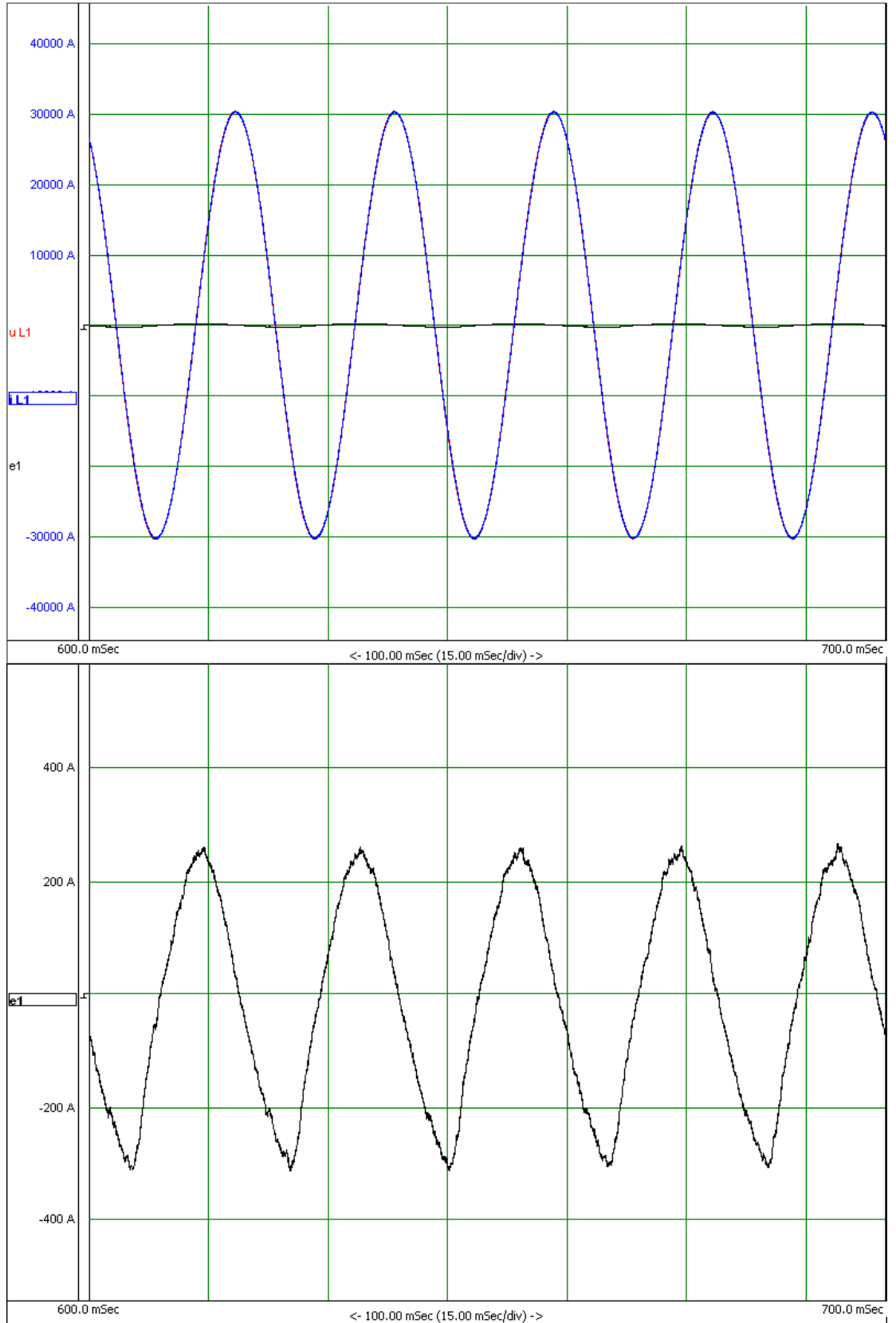
Şekil A.1.52 18.Test L1 Fazı Eğrileri



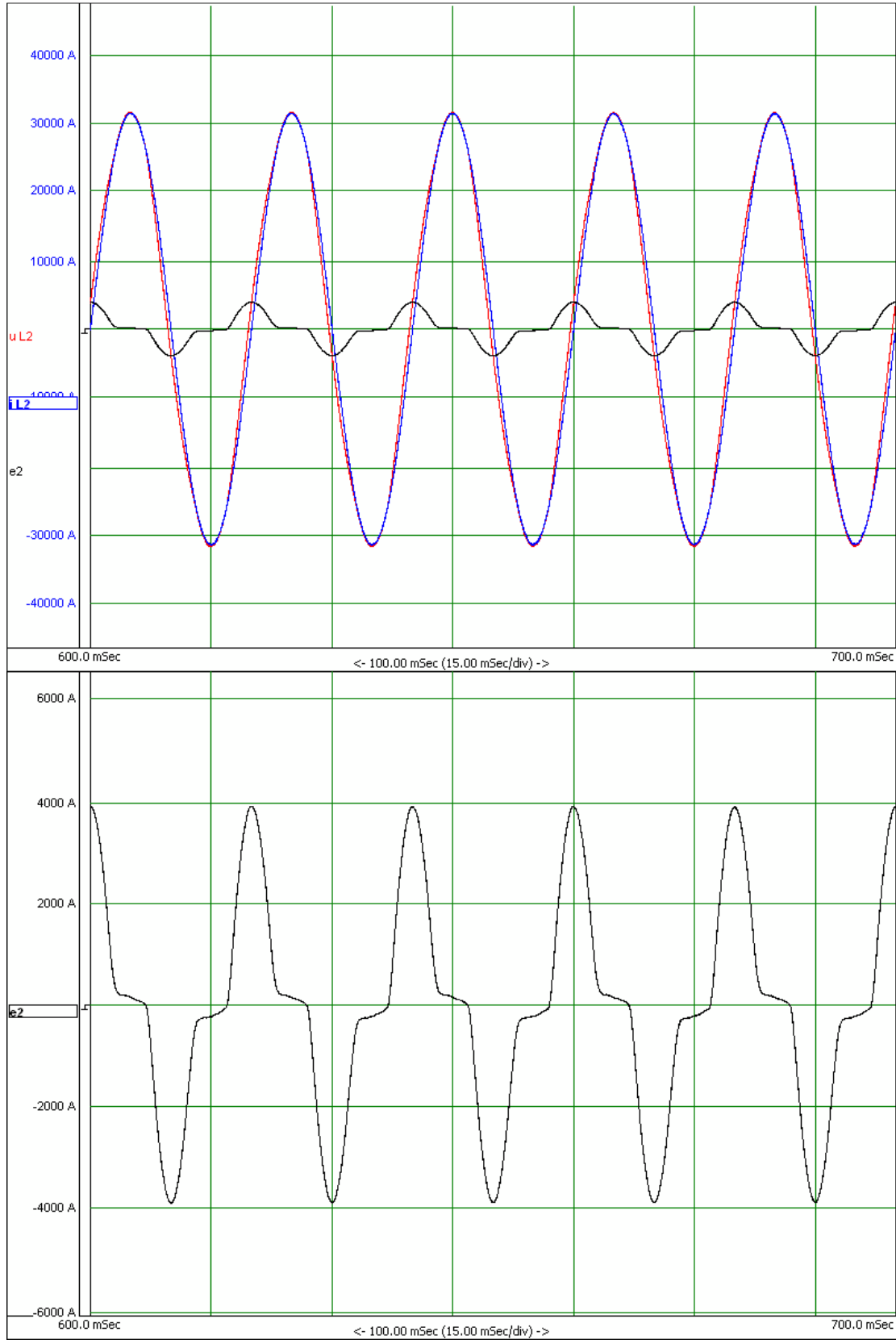
Şekil A.1.53 18.Test L2 Fazı Eğrileri



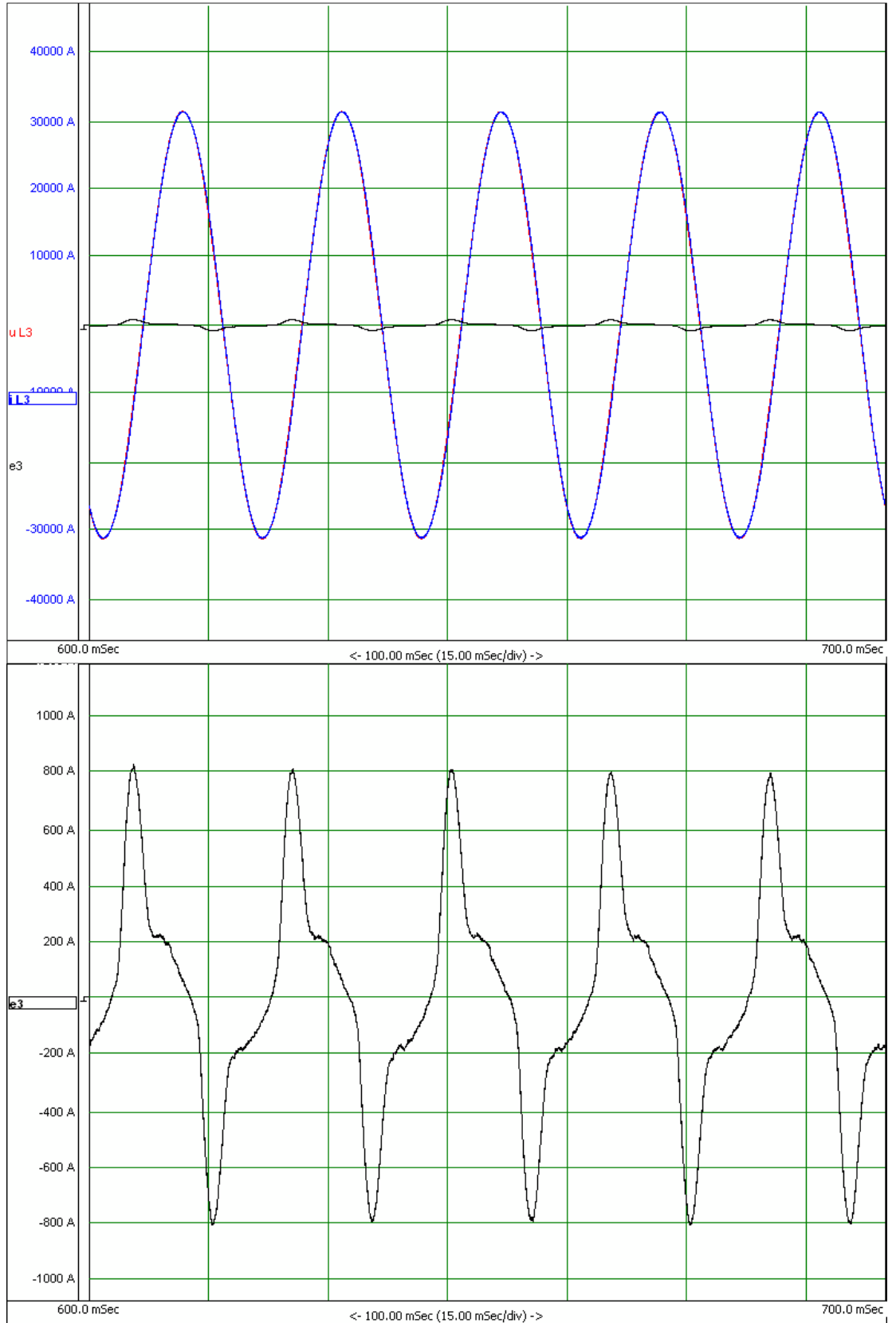
Şekil A.1.54 18.Test L3 Fazı Eğrileri



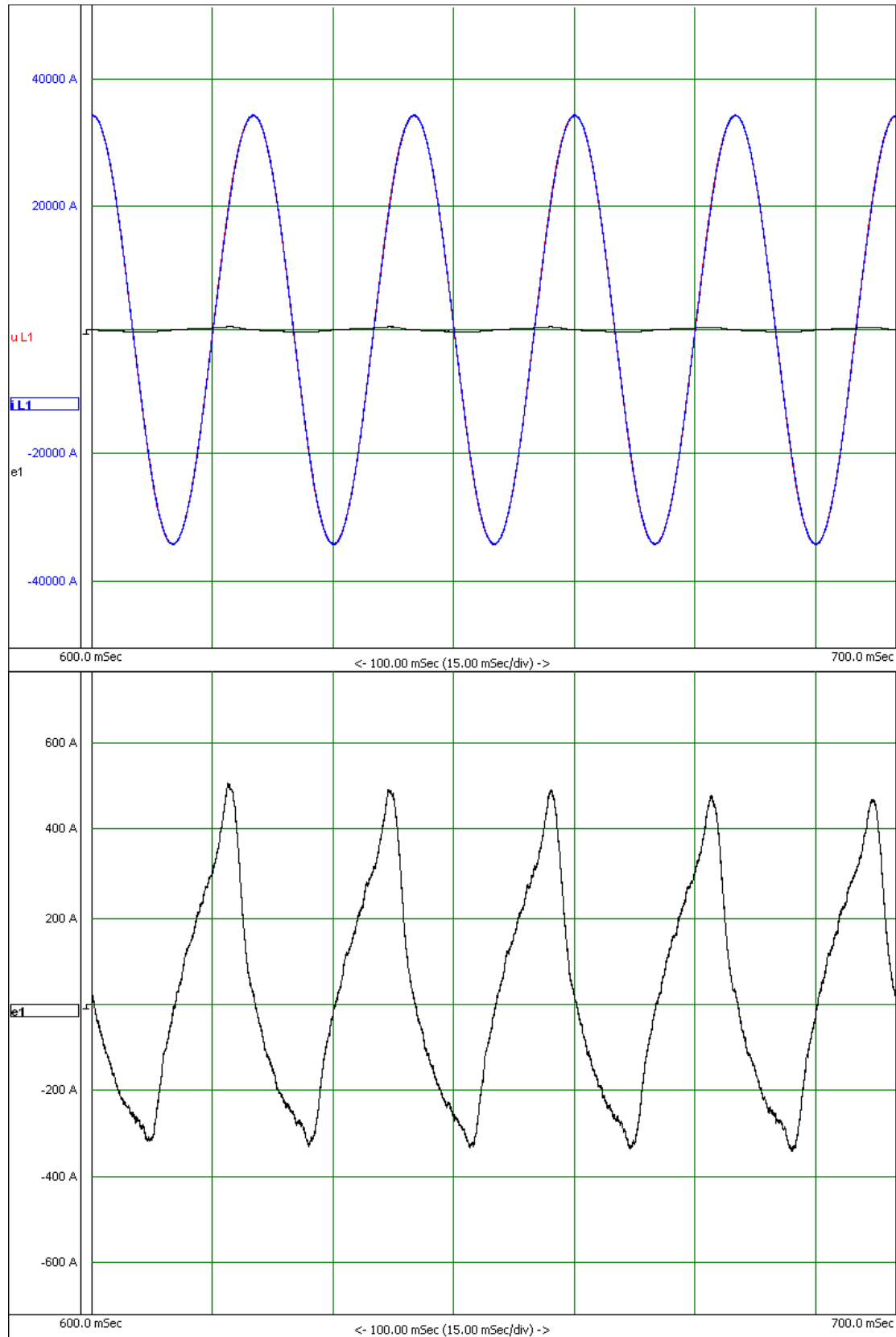
Şekil A.1.55 19.Test L1 Fazı Eğrileri



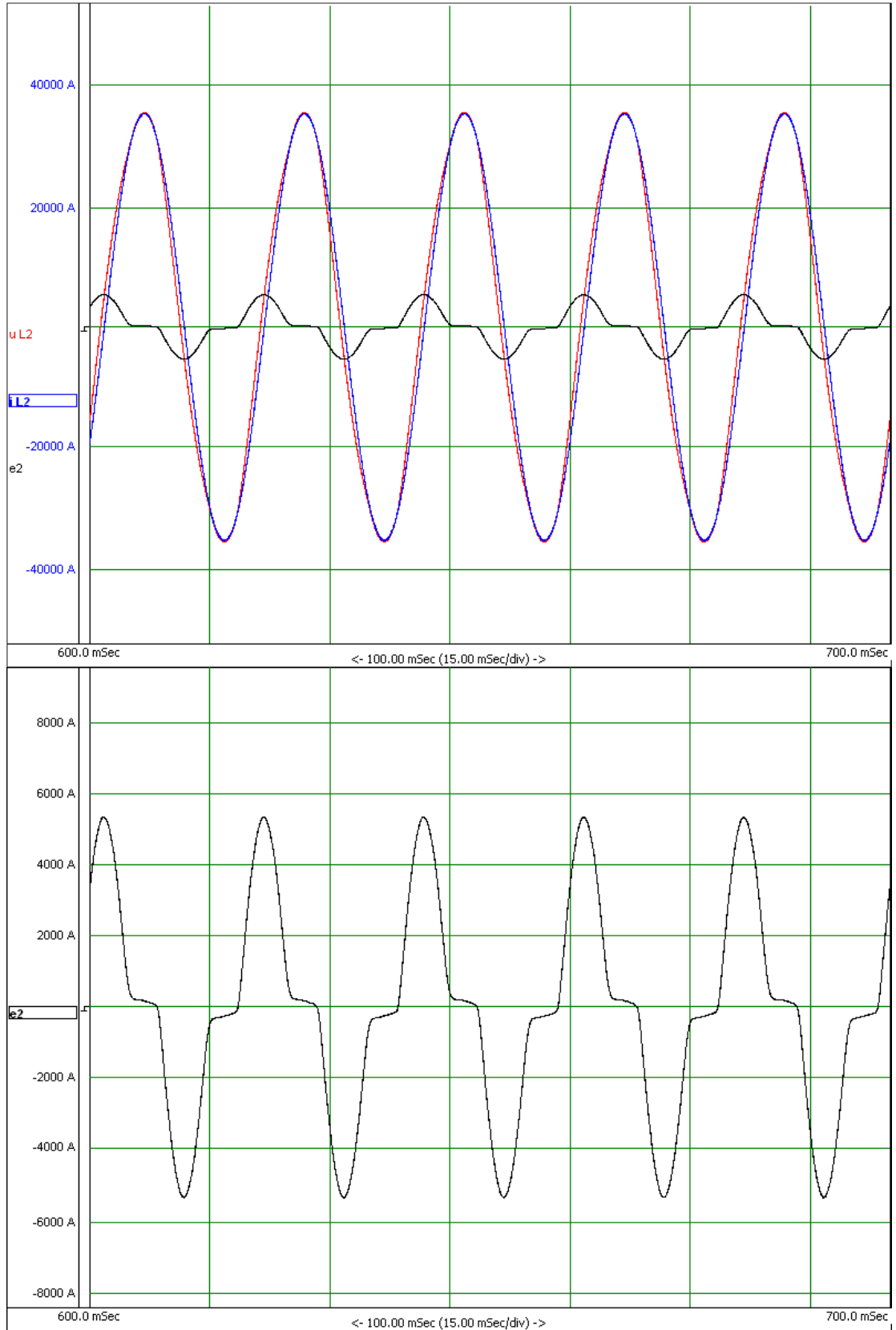
Şekil A.1.56 19.Test L2 Fazı Eğrileri



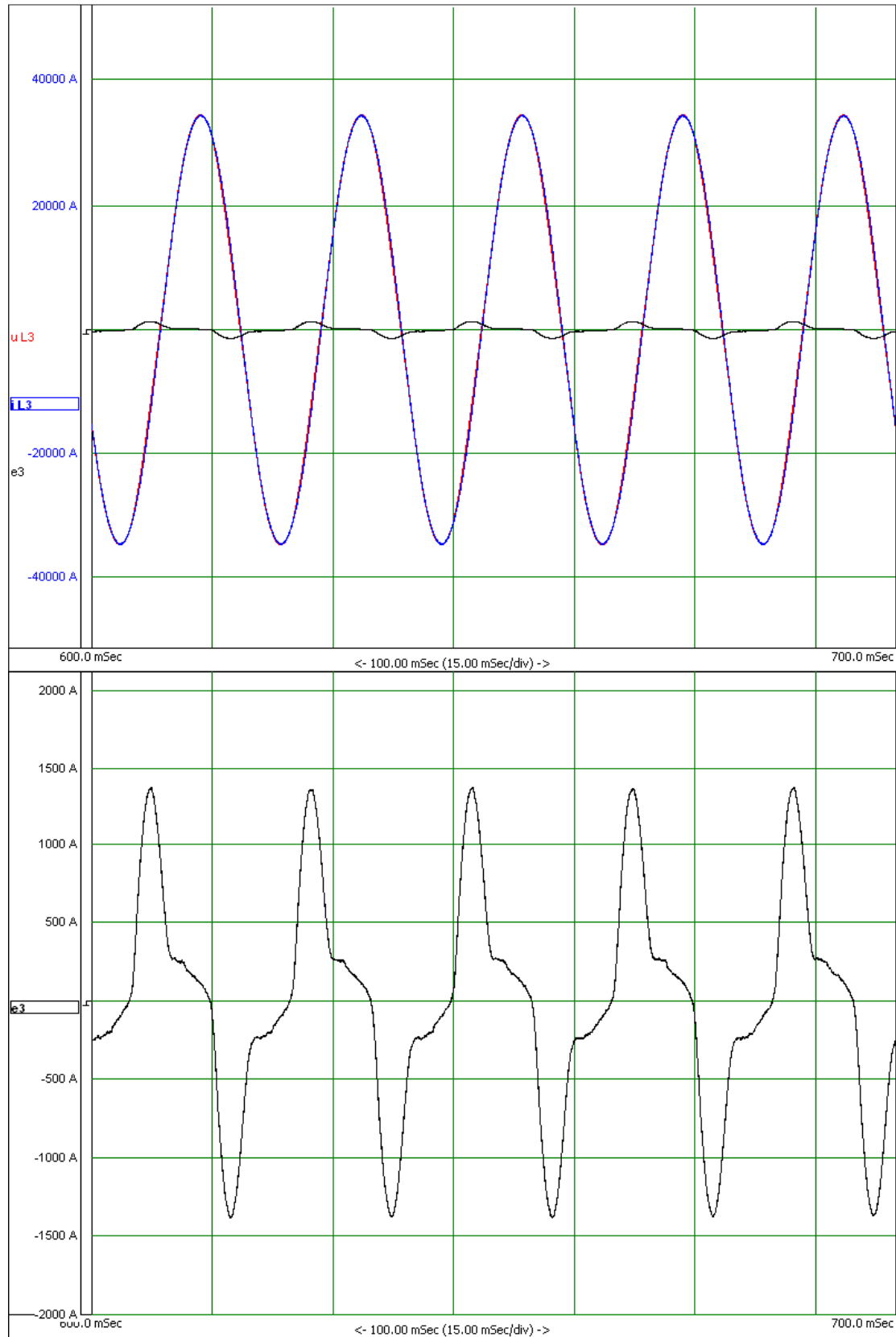
Şekil A.1.57 19.Test L3 Fazı Eğrileri



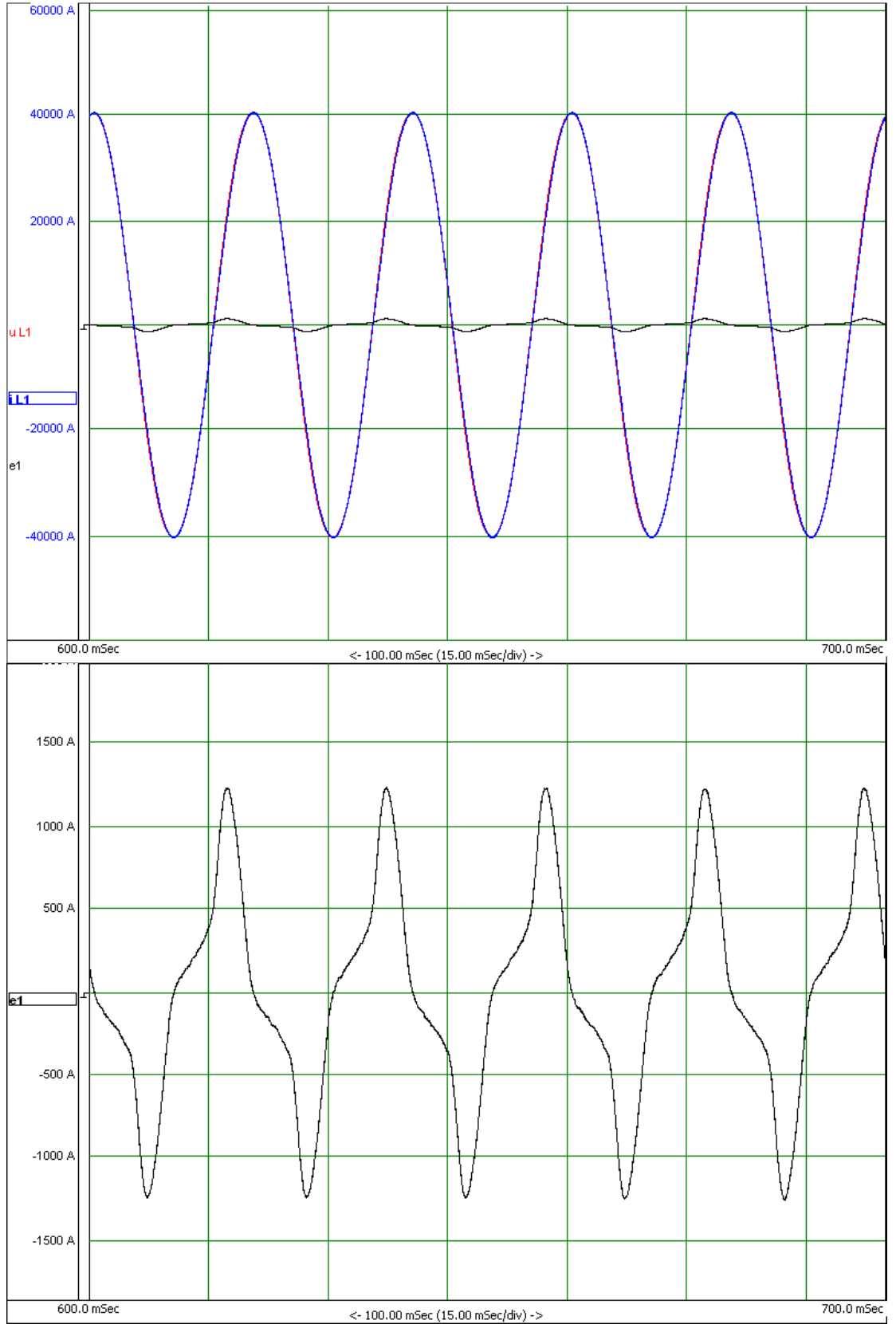
Şekil A.1.58 20.Test L1 Fazı Eğrileri



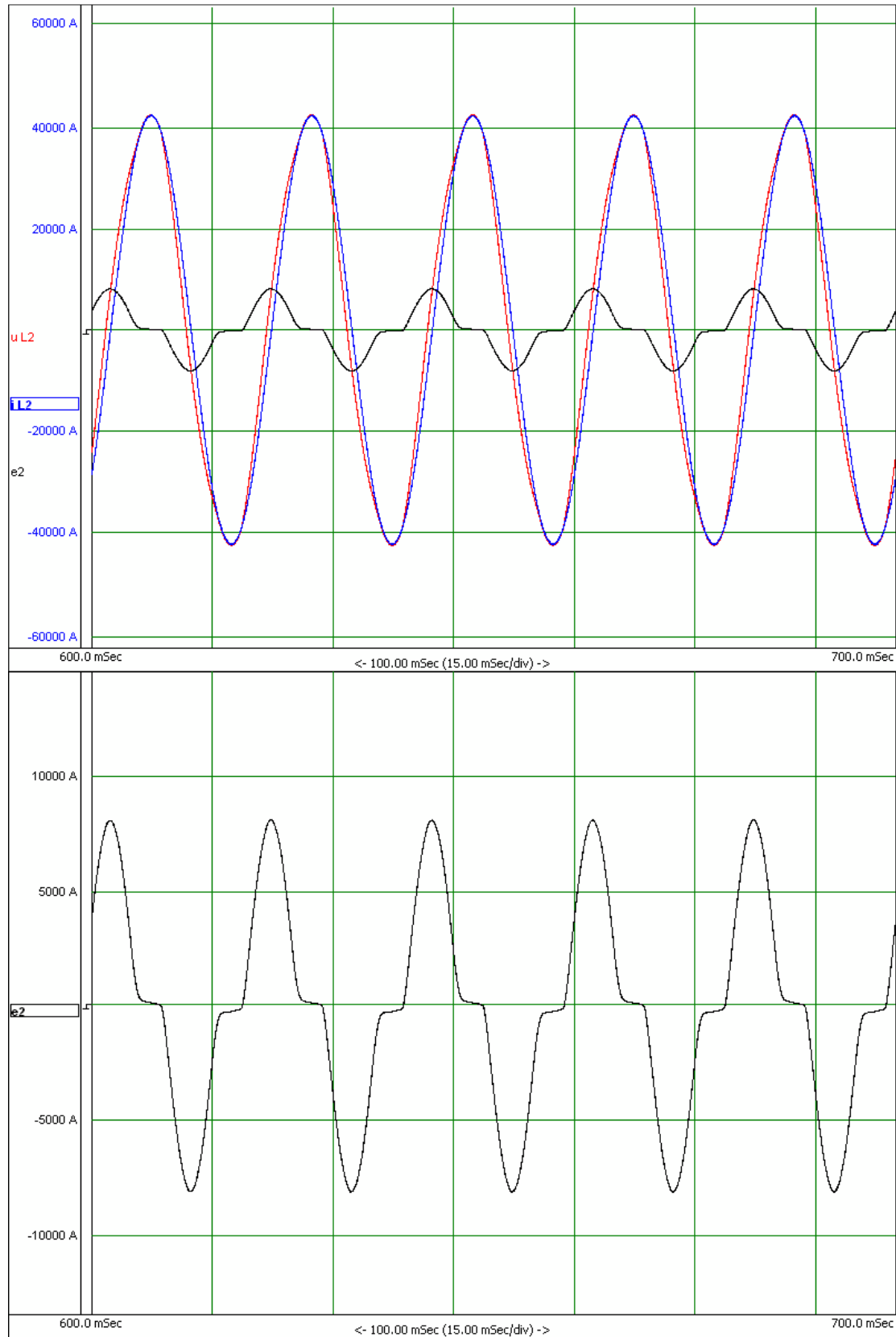
Şekil A.1.59 20.Test L2 Fazı Eğrileri



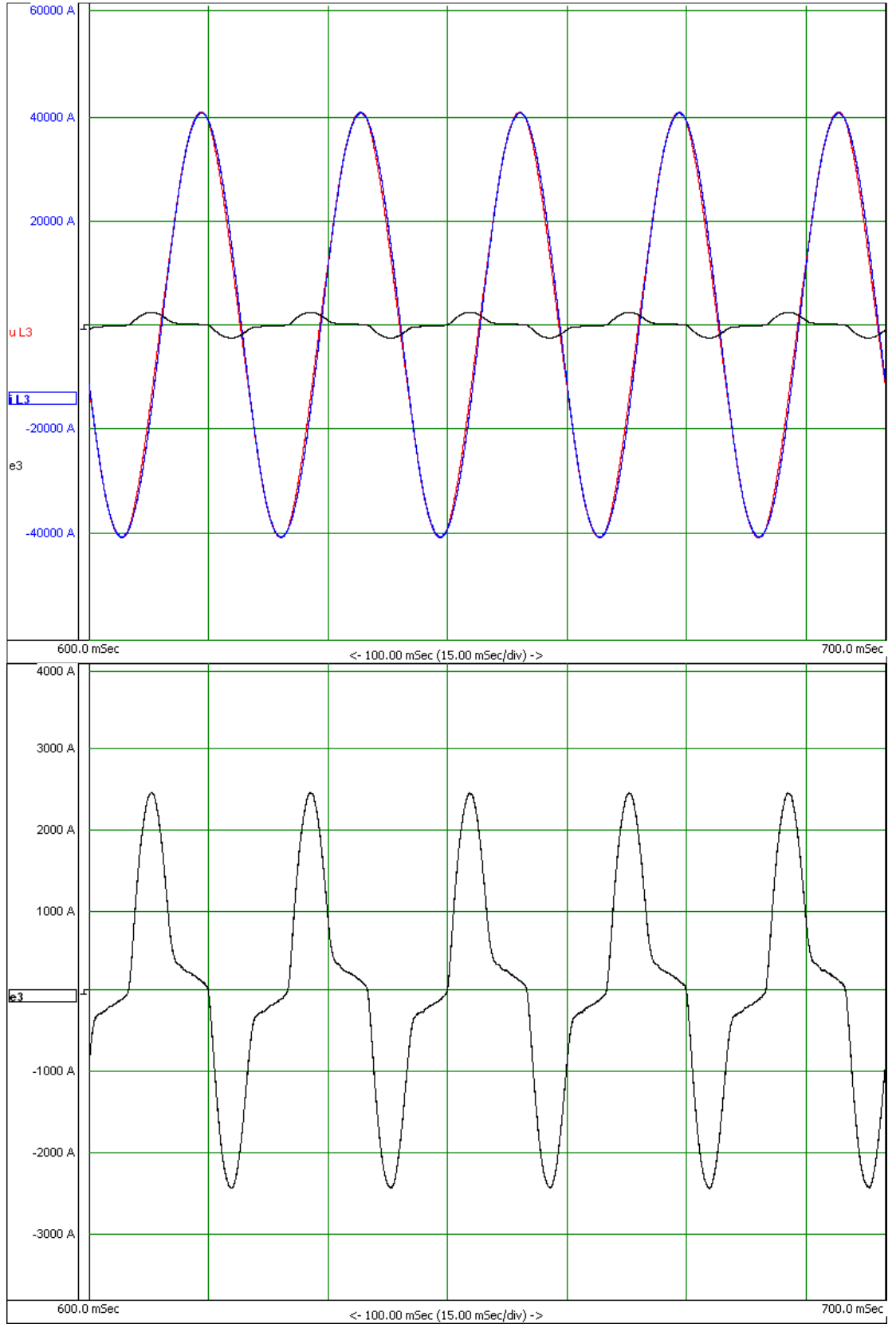
Şekil A.1.60 20.Test L3 Fazı Eğrileri



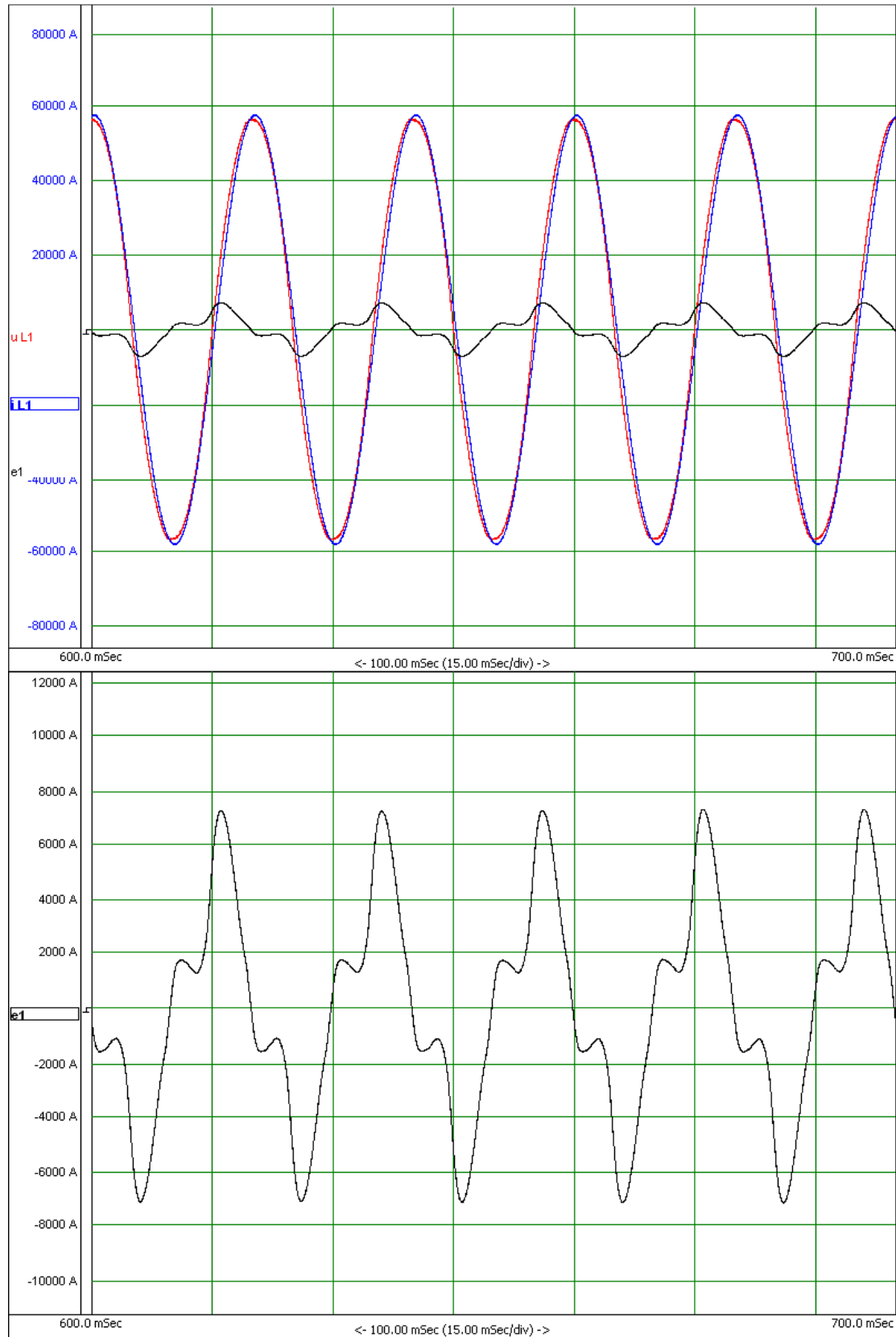
Şekil A.1.61 21.Test L1 Fazı Eğrileri



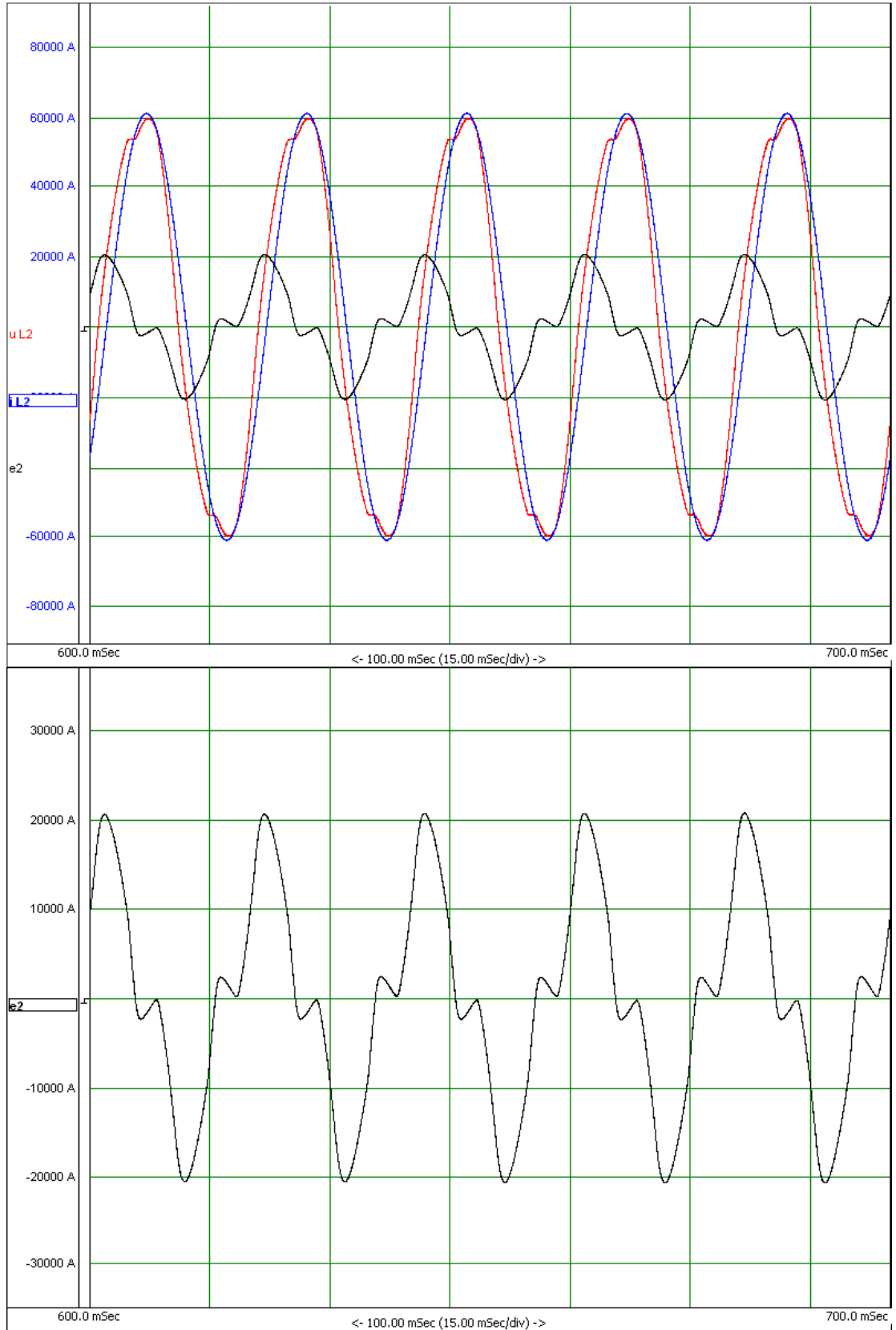
Şekil A.1.62 21.Test L2 Fazı Eğrileri



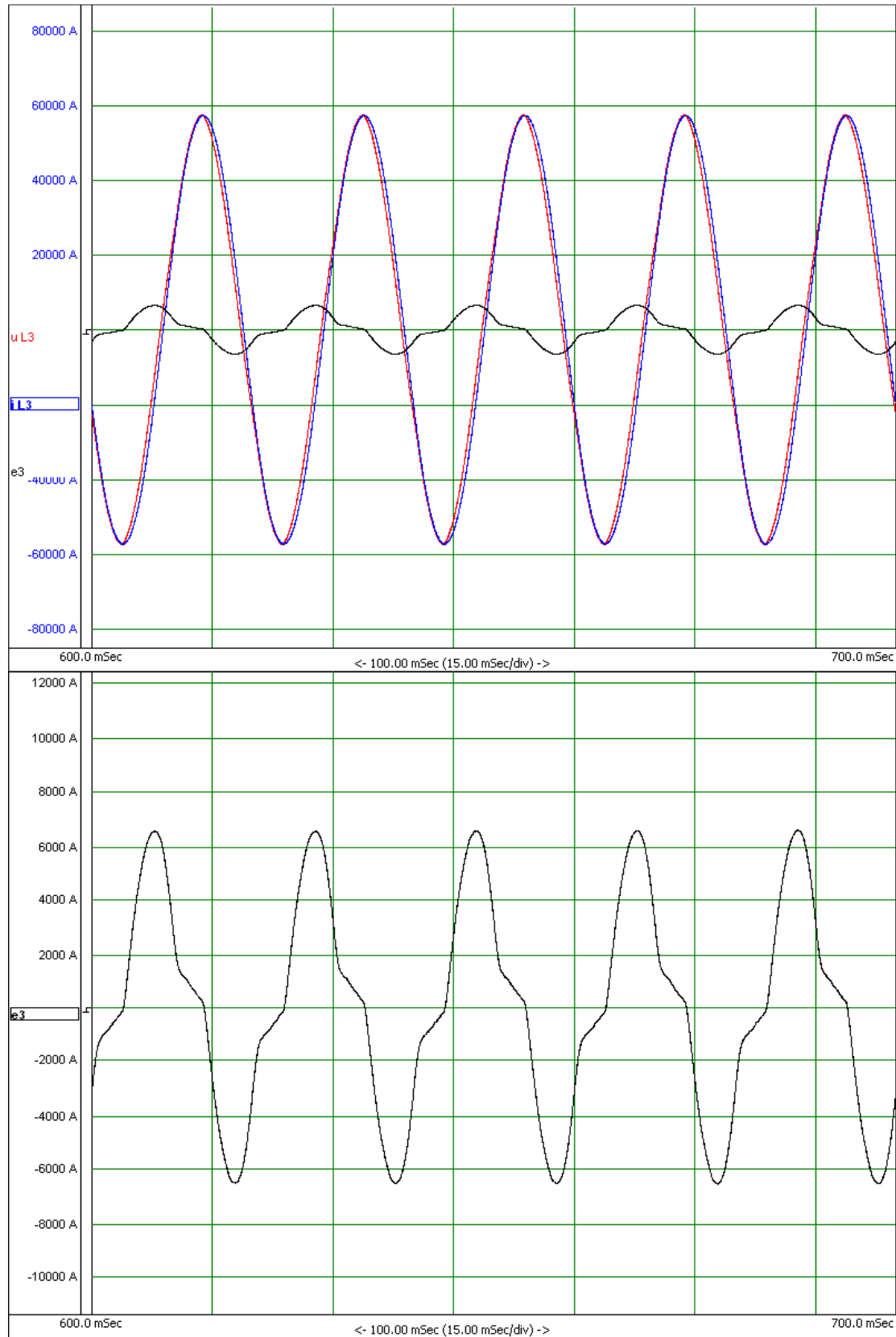
Şekil A.1.63 21.Test L3 Fazı Eğrileri



Şekil A.1.64 22.Test L1 Fazı Eğrileri

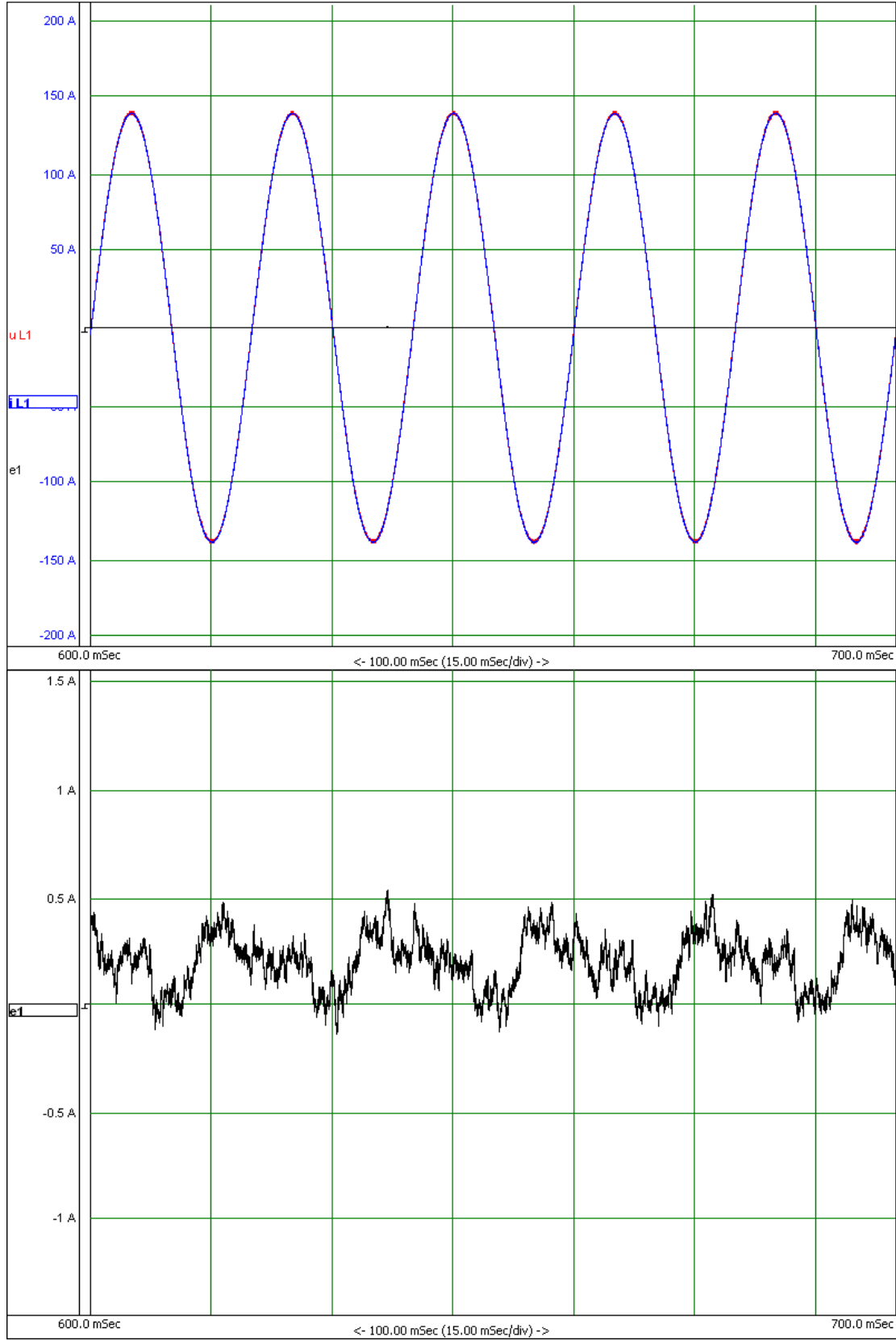


Şekil A.1.65 22.Test L2 Fazı Eğrileri

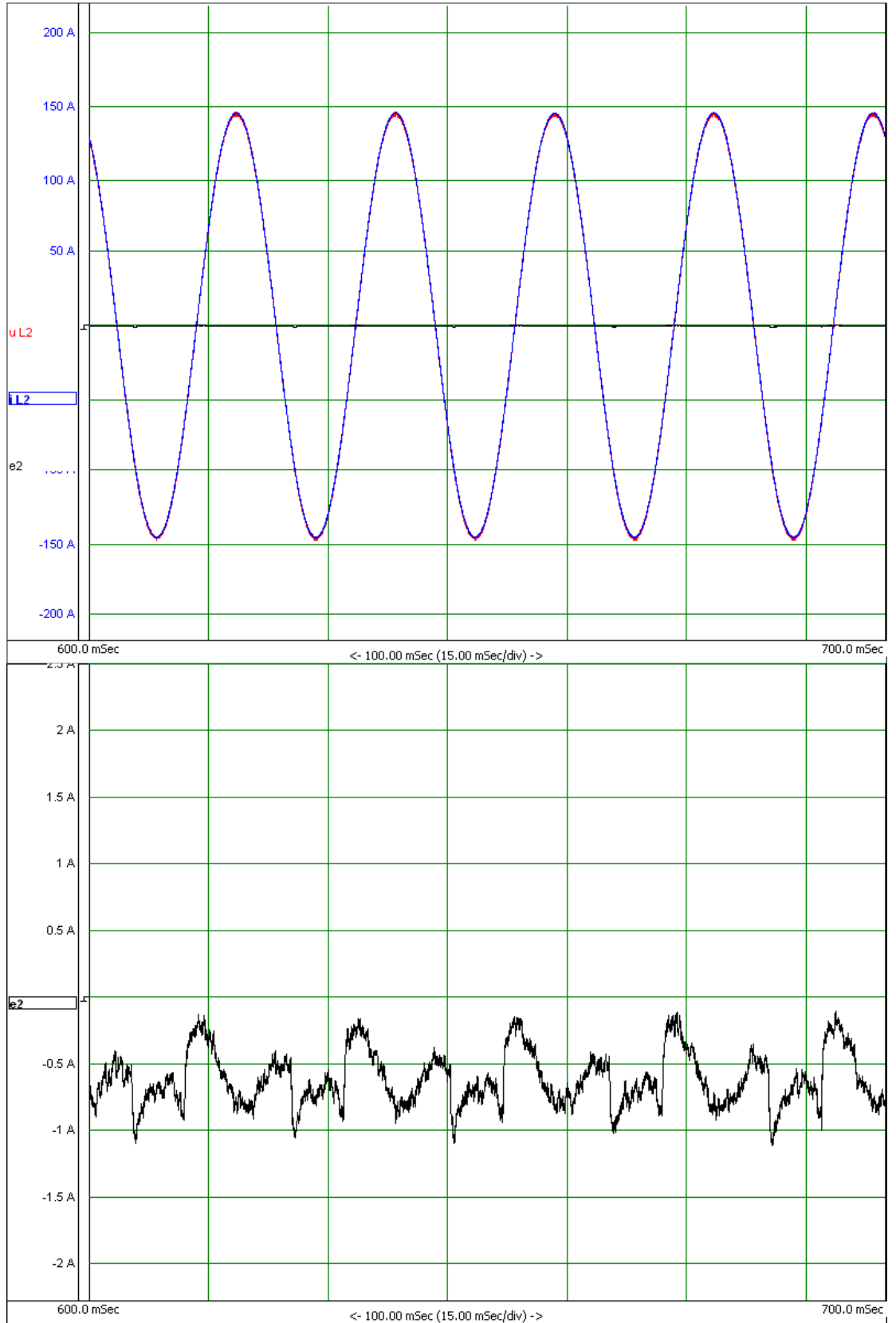


Şekil A.1.66 22.Test L3 Fazı Eğrileri

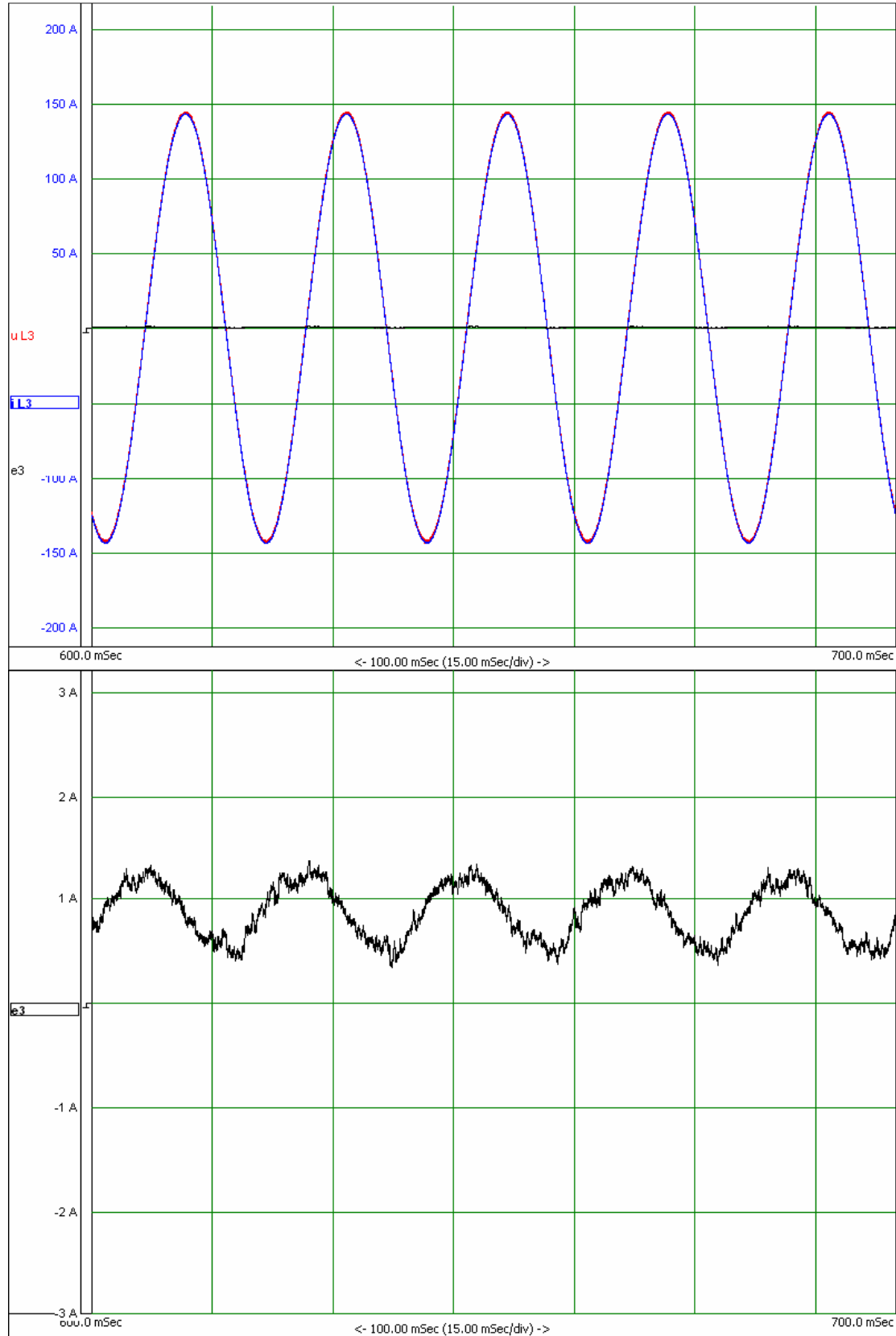
EK A.1



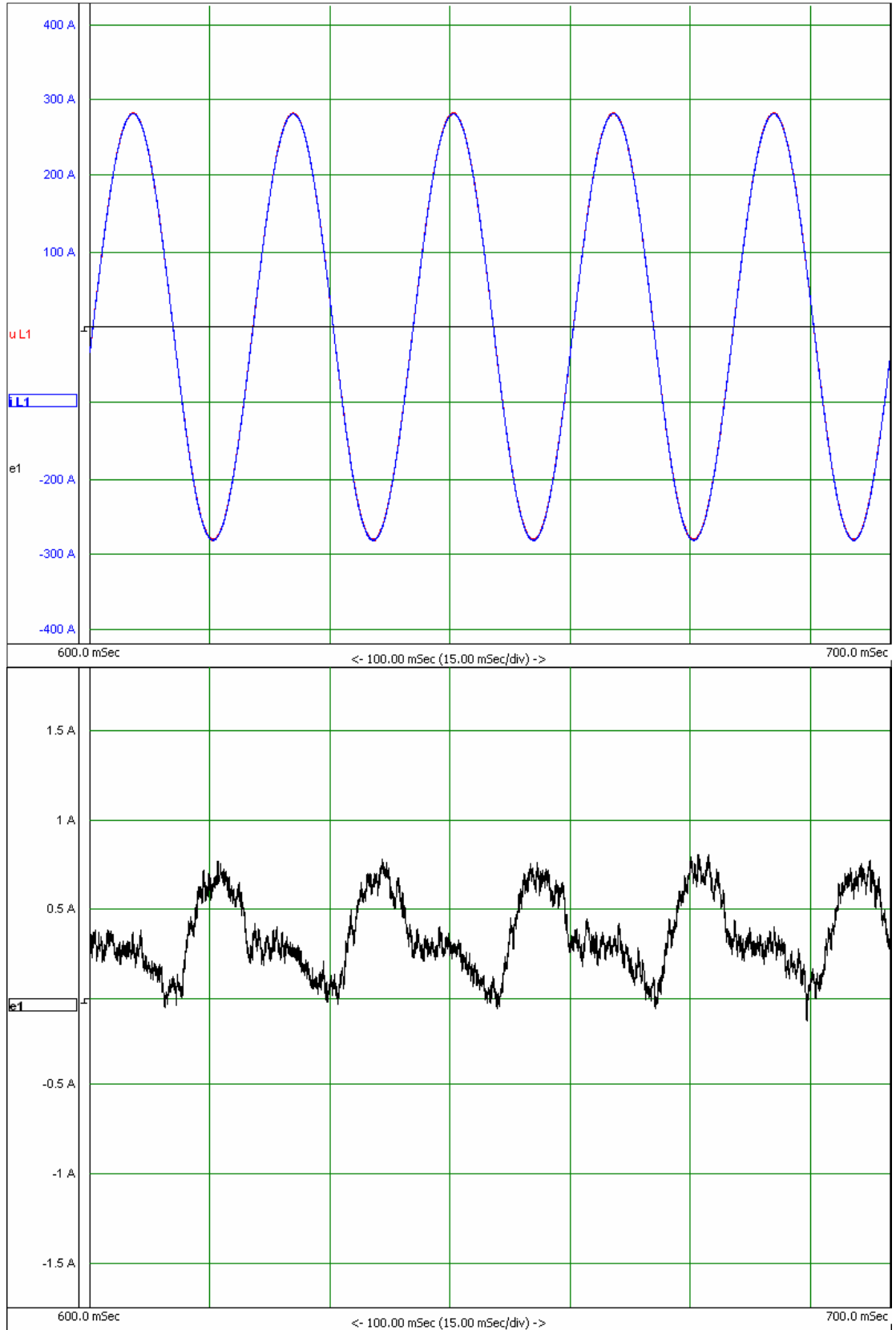
Şekil A.2.1 23.Test L1 Fazı Eğrileri



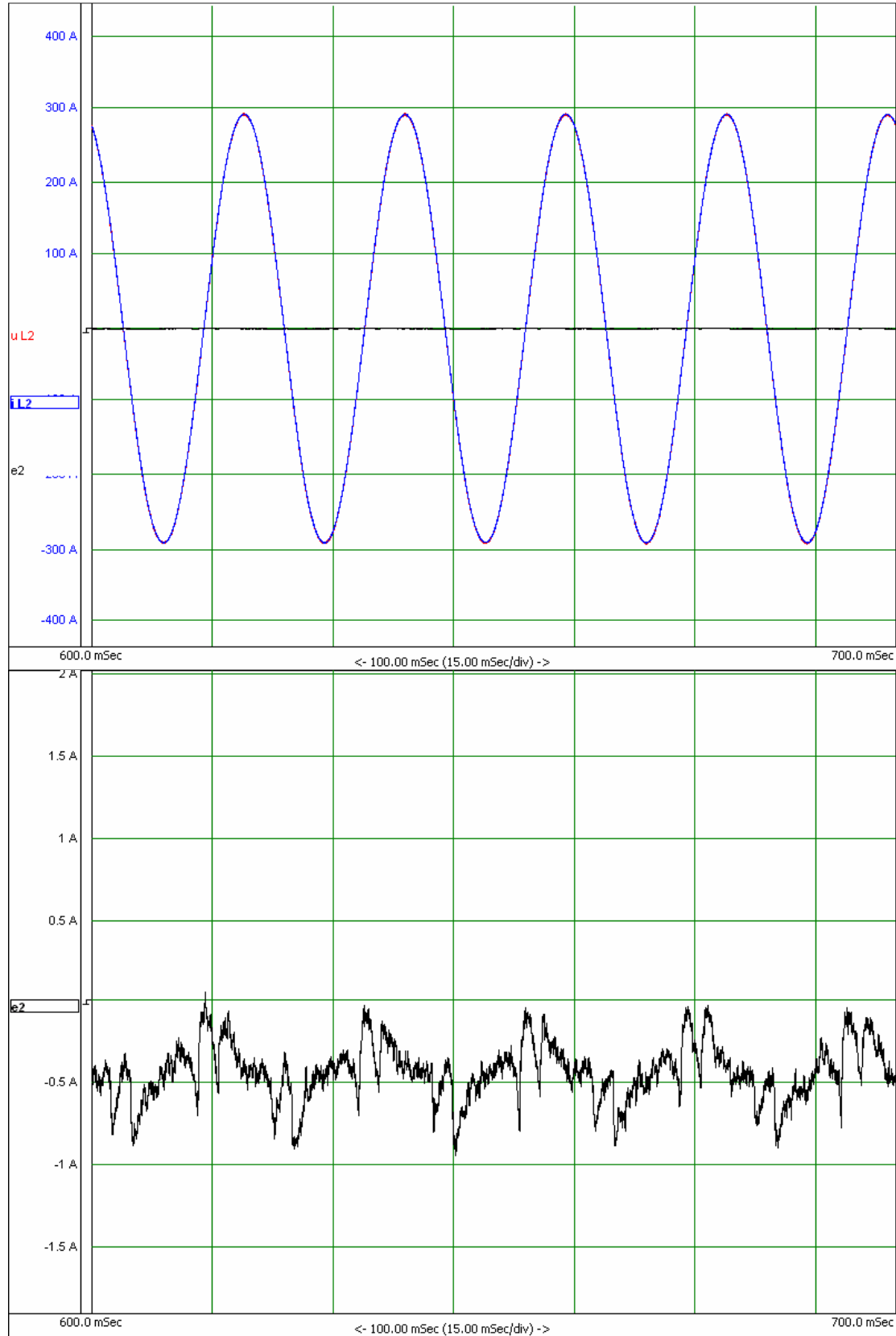
Şekil A.2.2 23.Test L2 Fazı Eğrileri



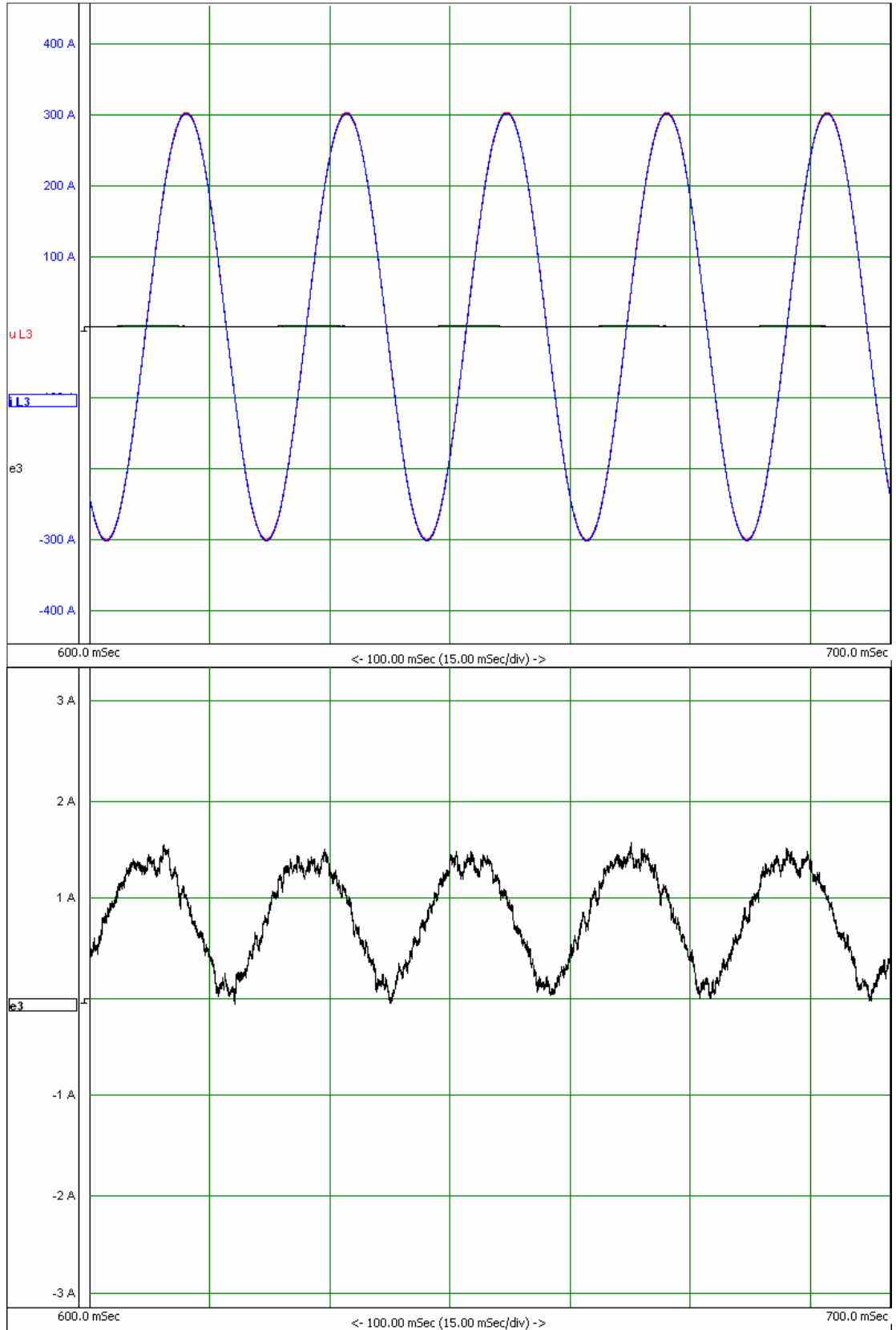
Şekil A.2.3 23.Test L3 Fazı Eğrileri



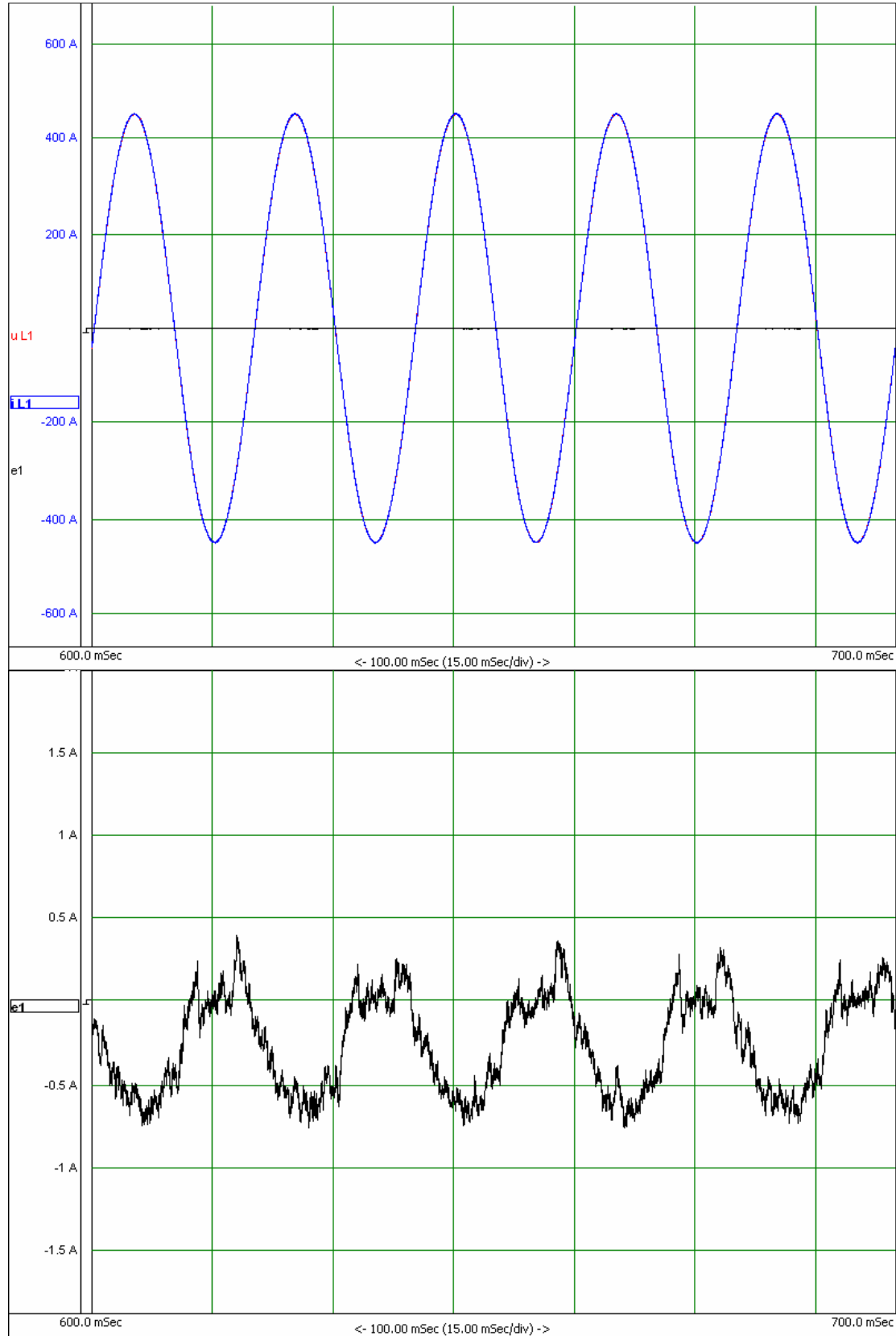
Şekil A.2.4 24.Test L1 Fazı Eğrileri



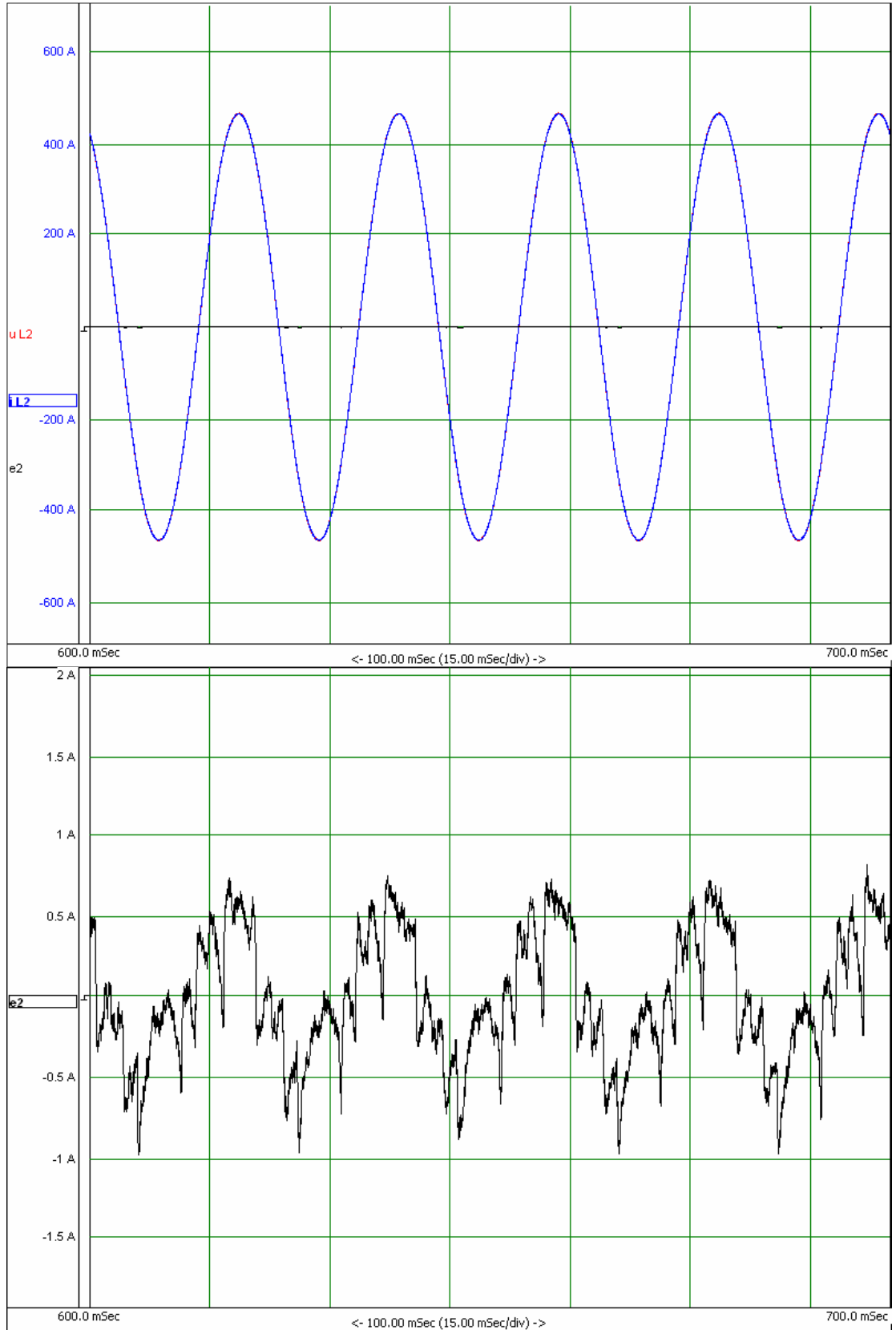
Şekil A.2.5 24.Test L2 Fazı Eğrileri



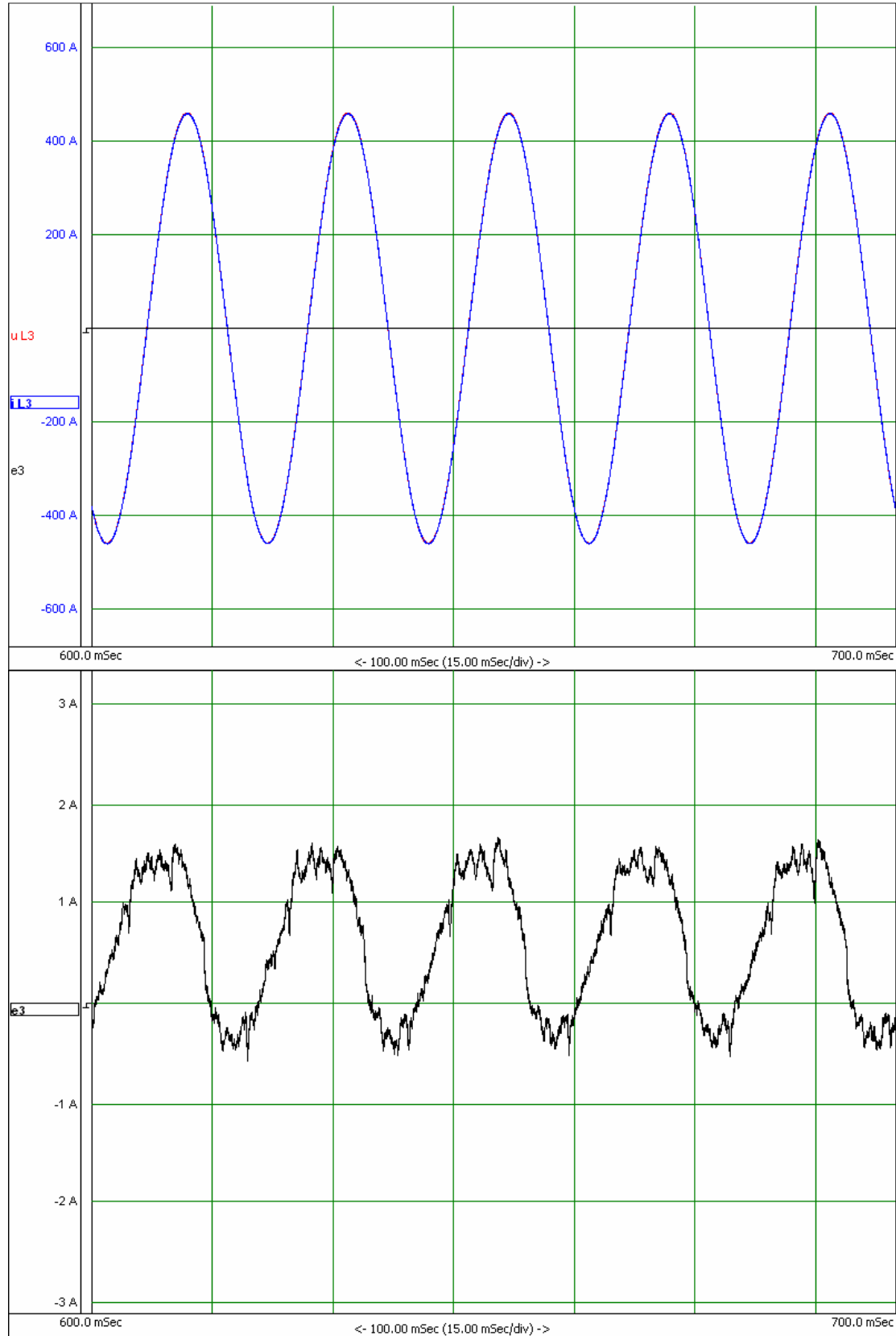
Şekil A.2.6 24.Test L3 Fazı Eğrileri



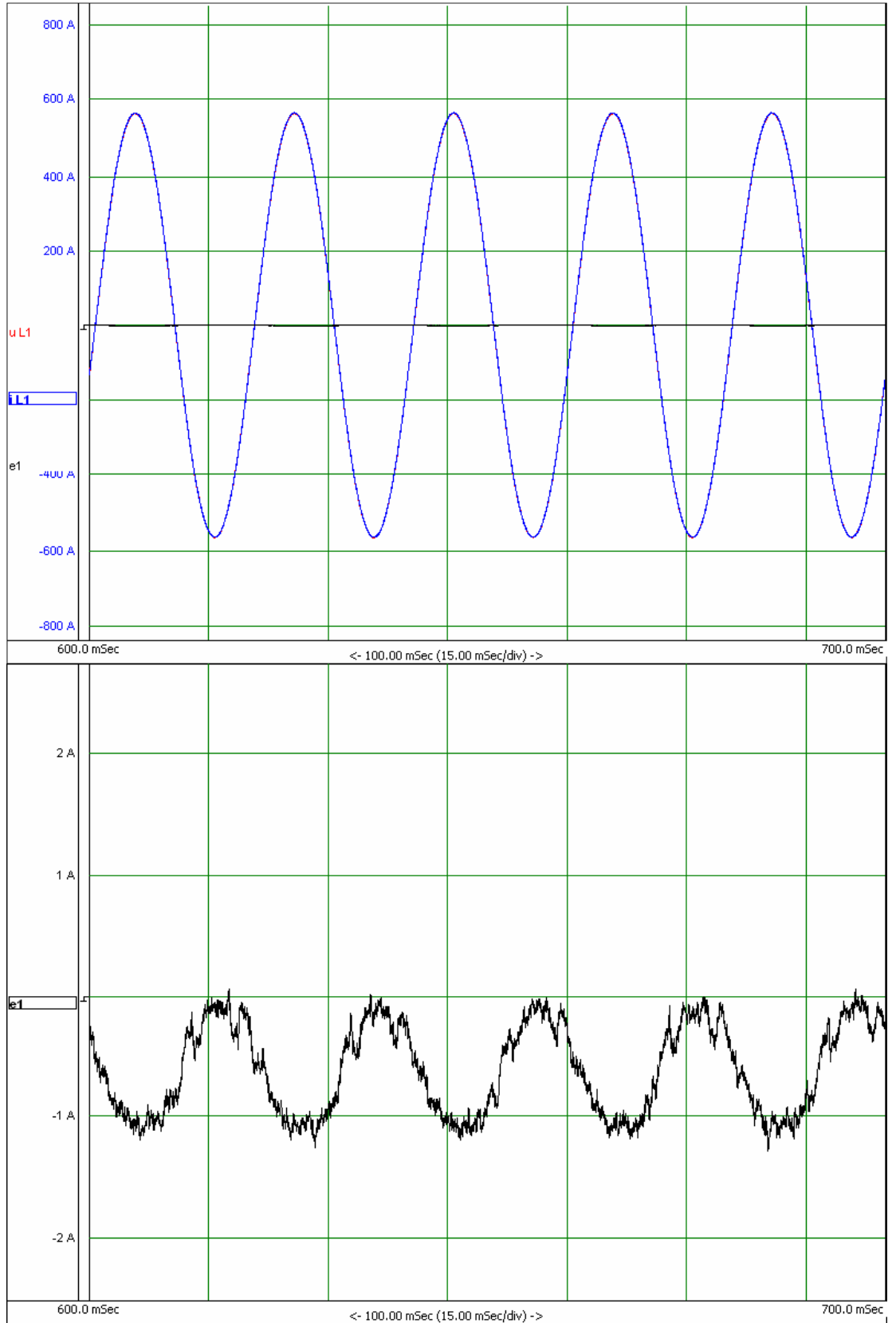
Şekil A.2.7 25.Test L1 Fazı Eğrileri



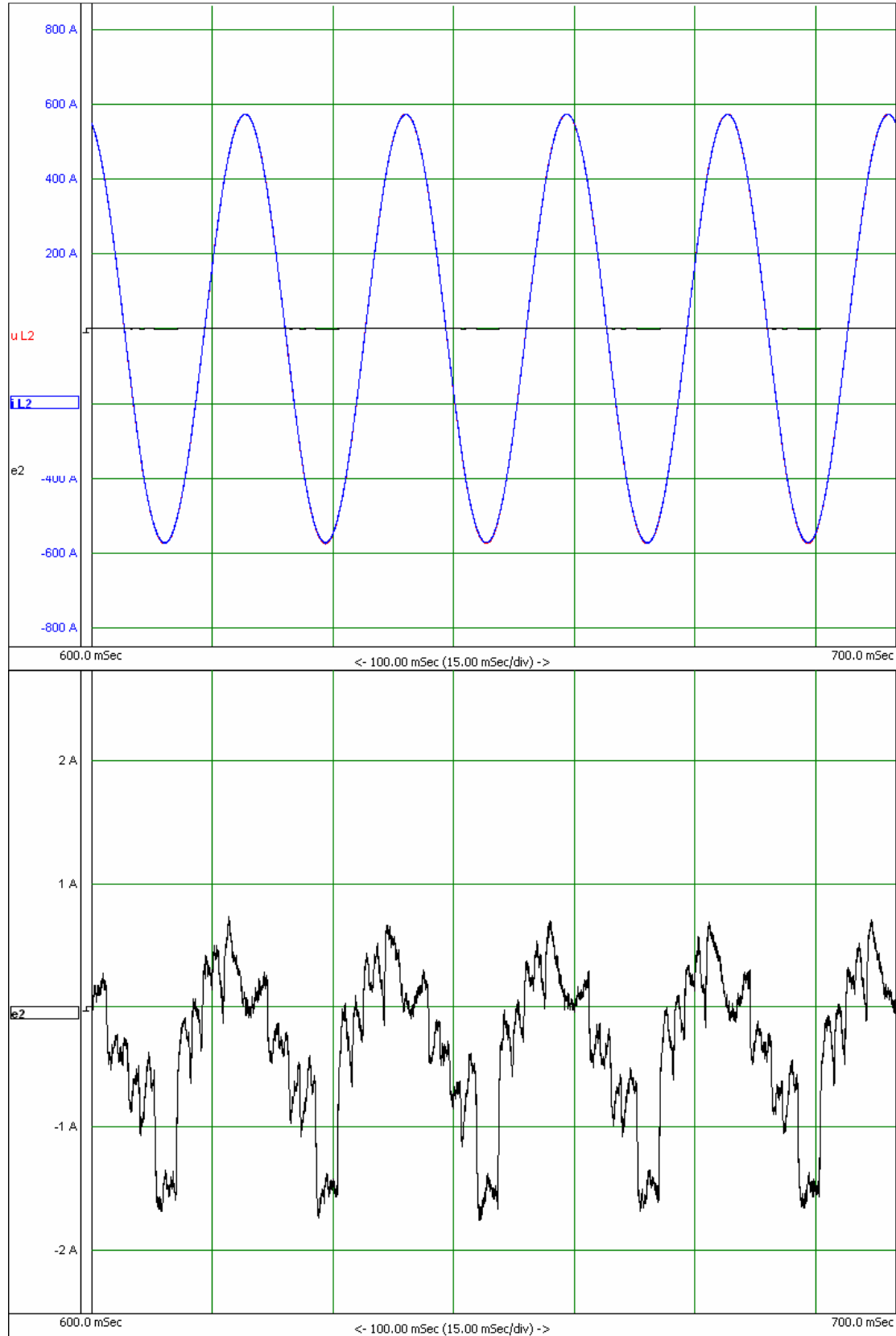
Şekil A.2.8 25.Test L2 Fazı Eğrileri



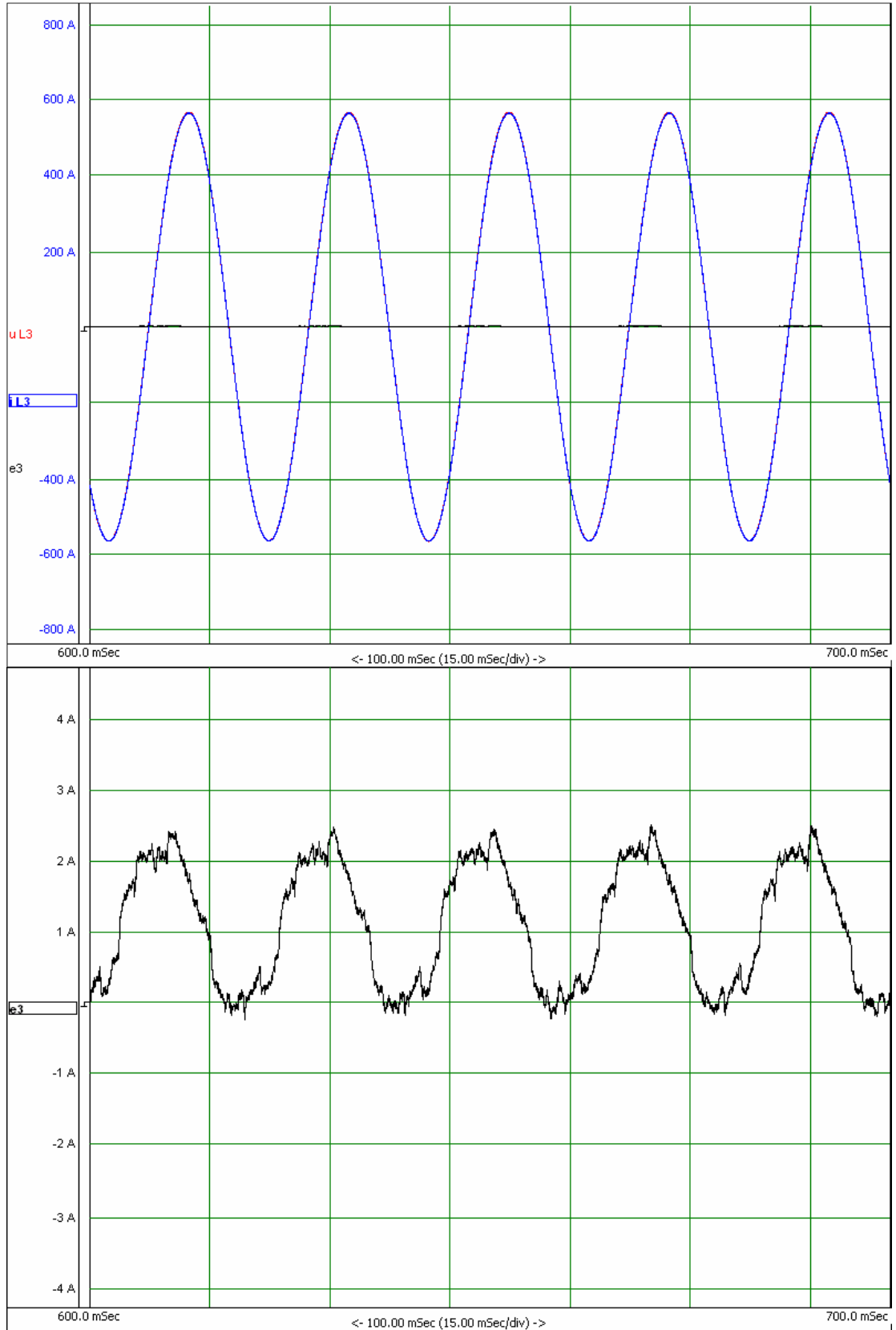
Şekil A.2.9 25.Test L3 Fazı Eğrileri



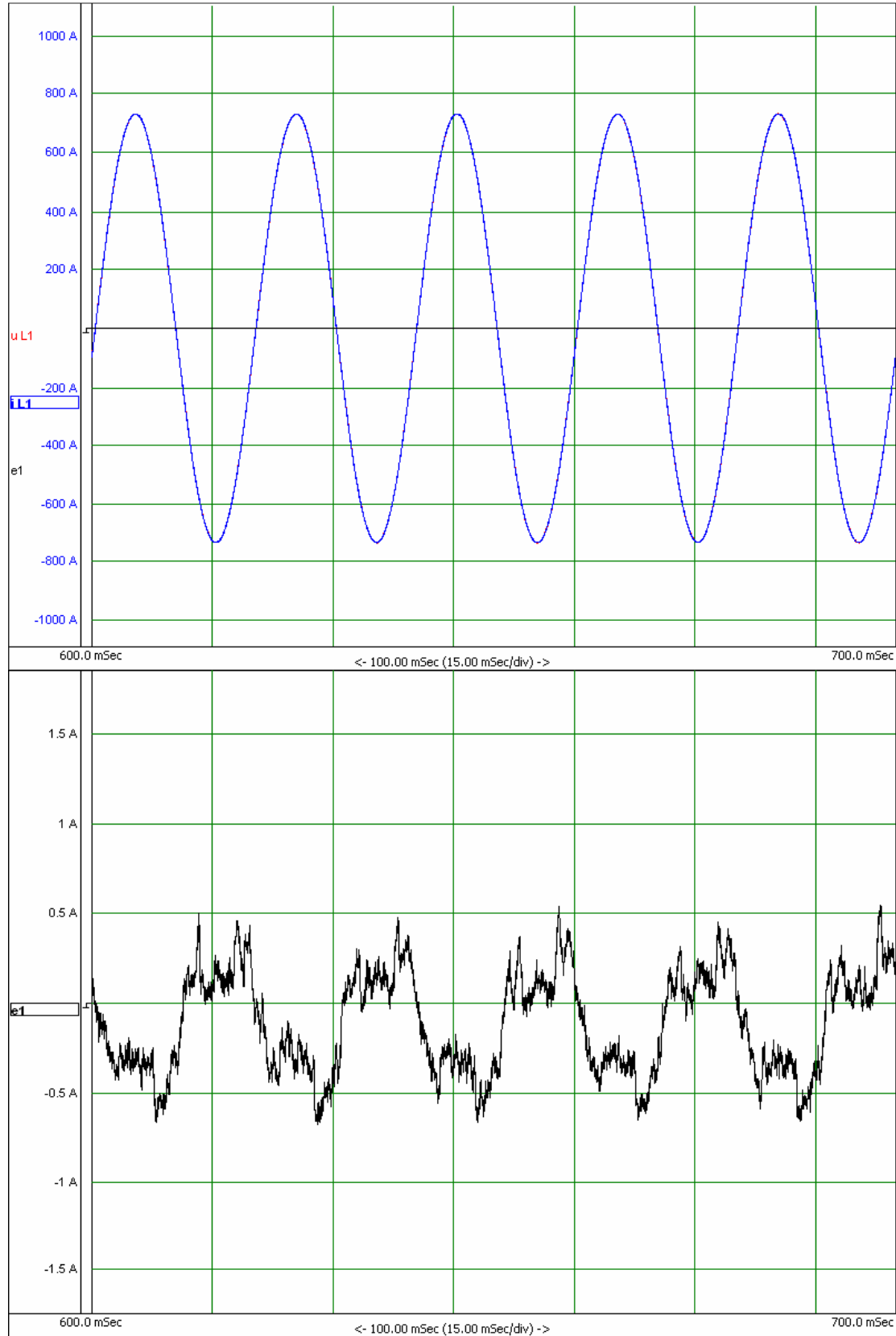
Şekil A.2.10 26.Test L1 Fazı Eğrileri



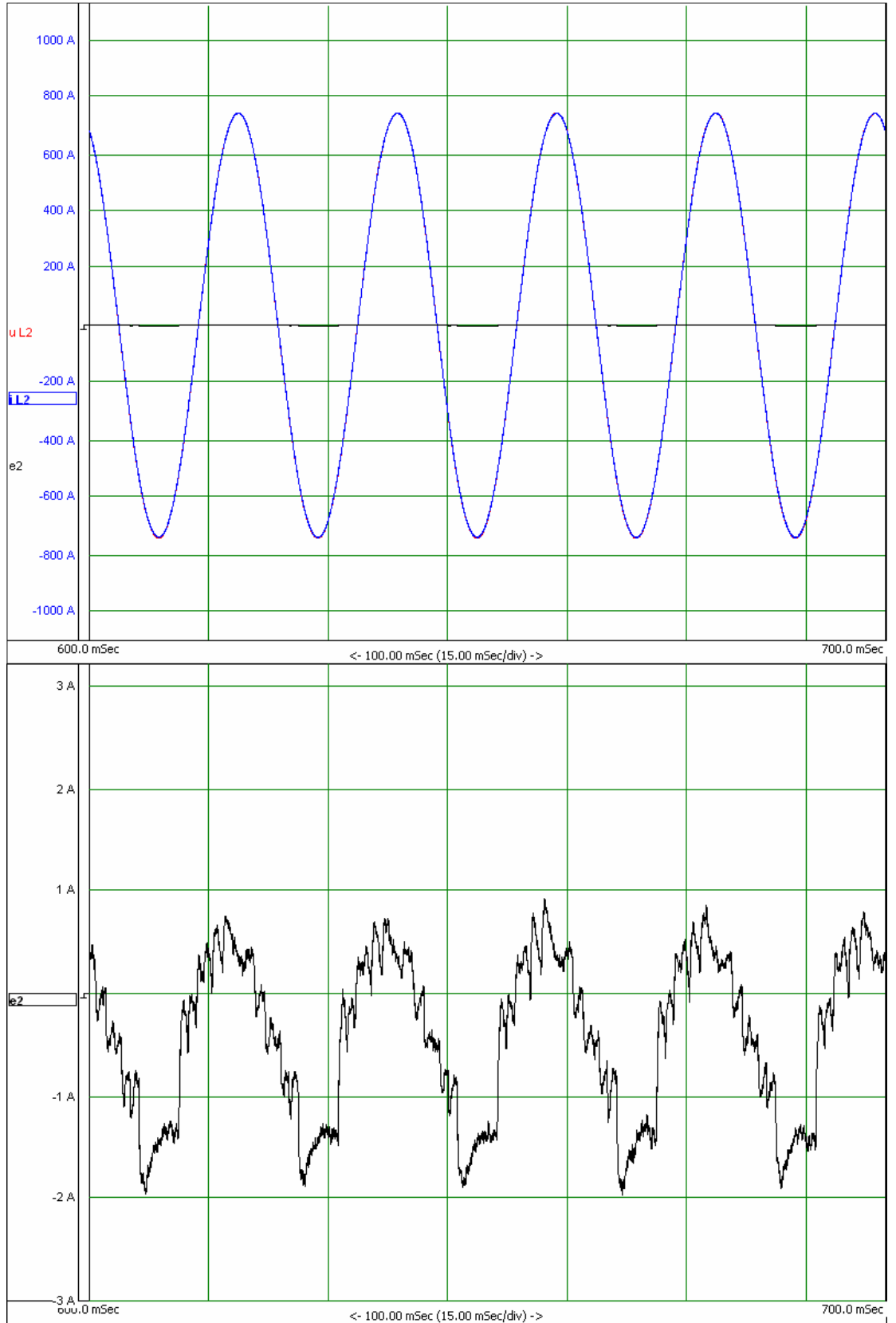
Şekil A.2.11 26.Test L2 Fazı Eğrileri



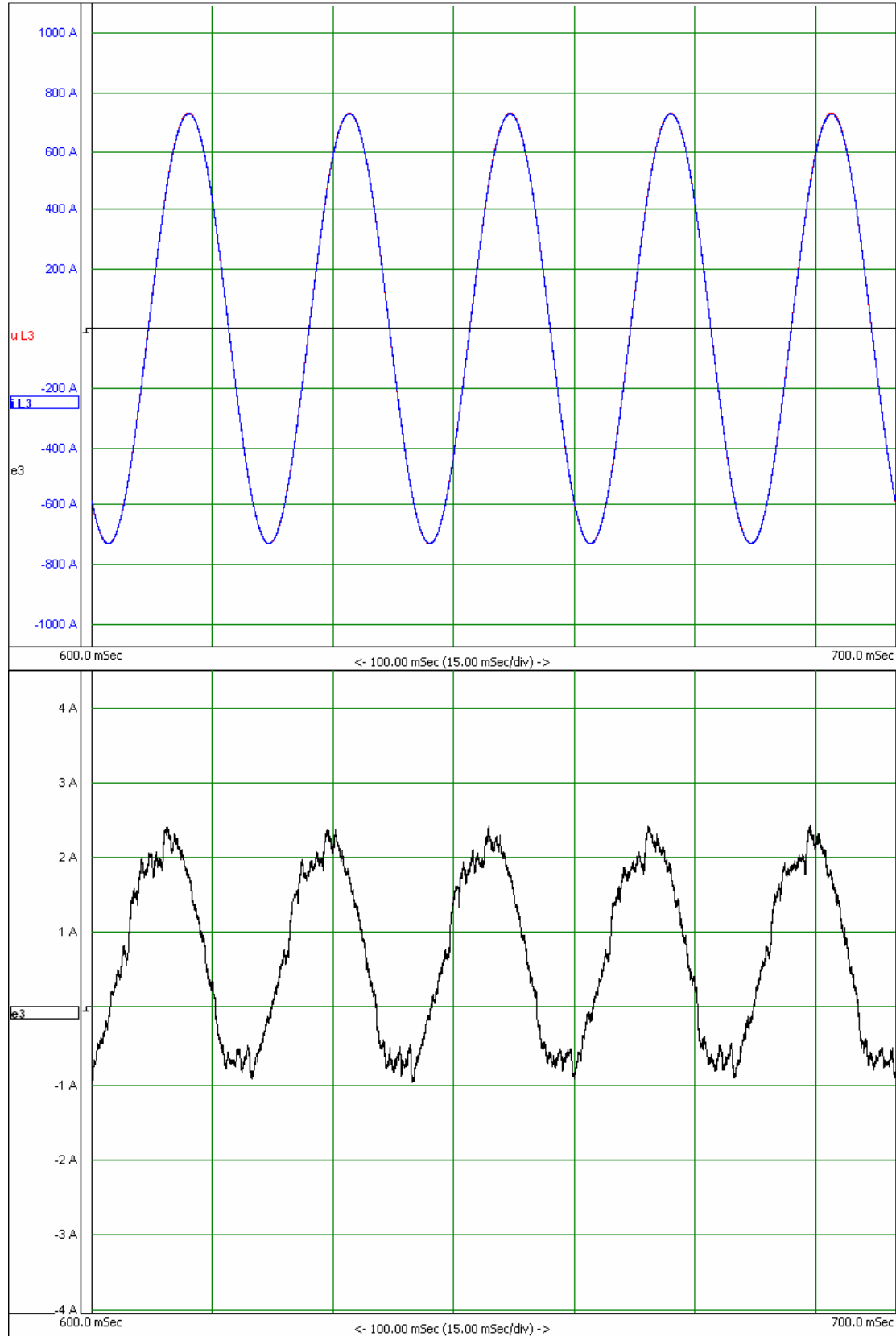
Şekil A.2.12 26.Test L3 Fazı Eğrileri



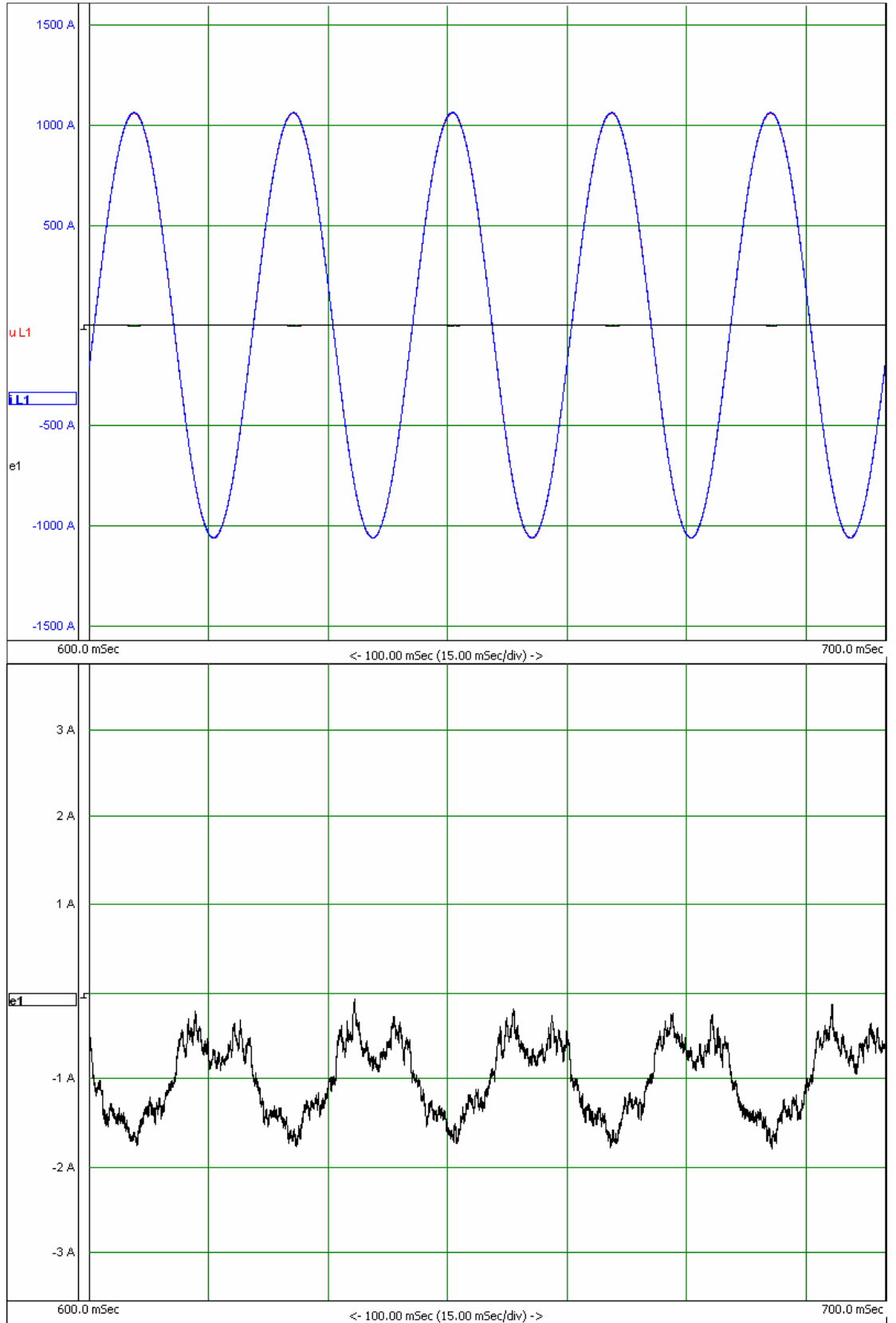
Şekil A.2.13 27.Test L1 Fazı Eğrileri



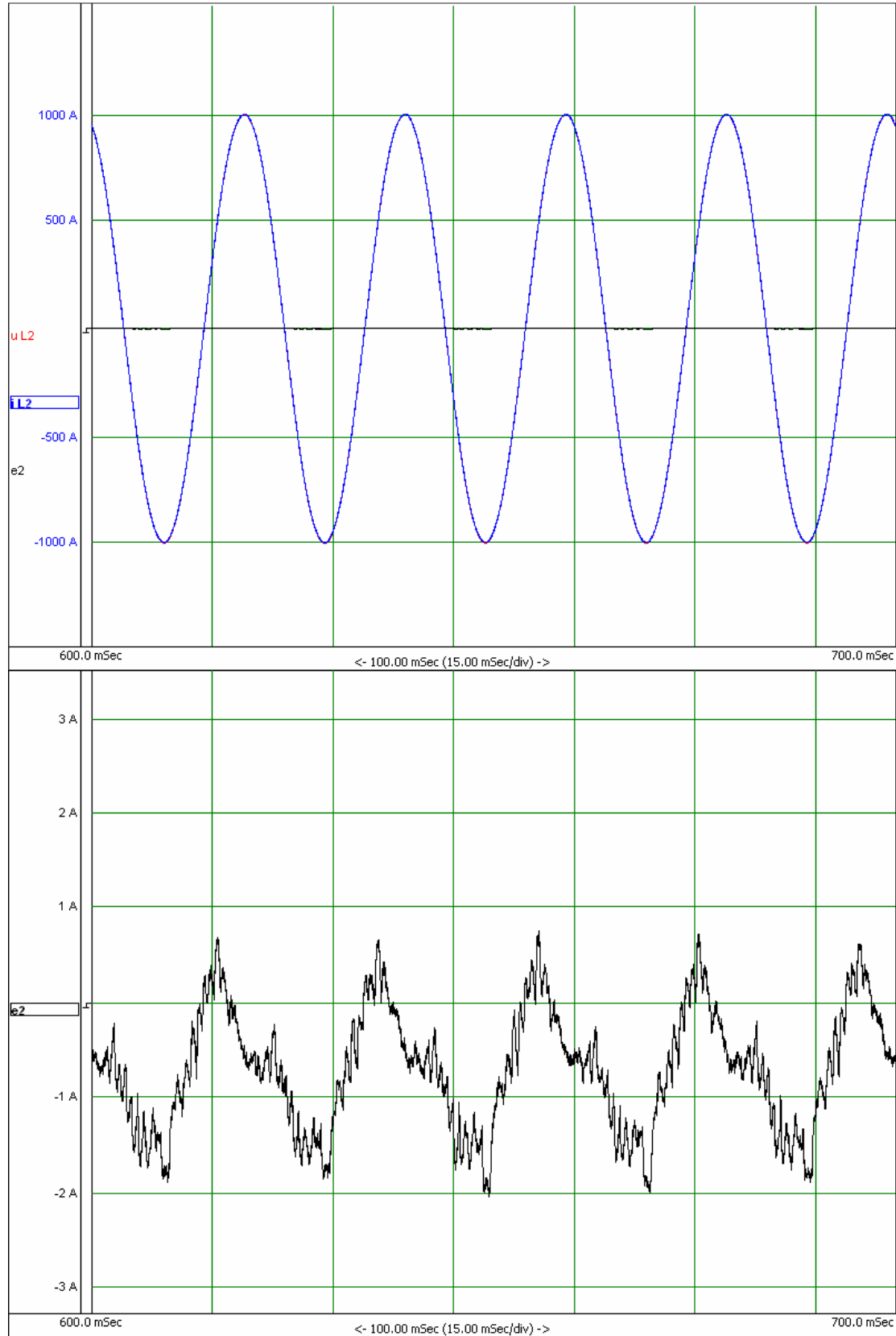
Şekil A.2.14 27.Test L2 Fazı Eğrileri



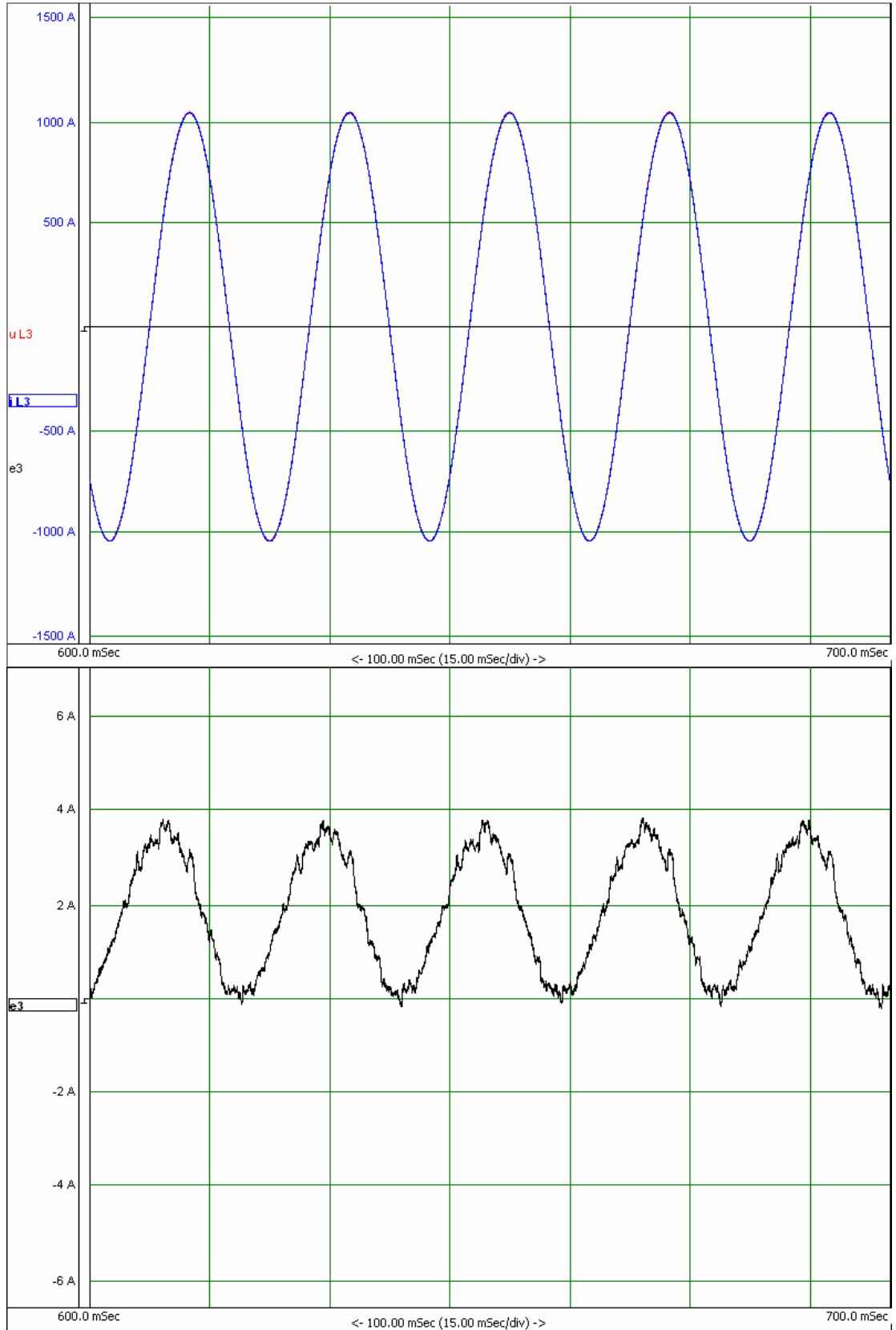
Şekil A.2.15 27.Test L3 Fazı Eğrileri



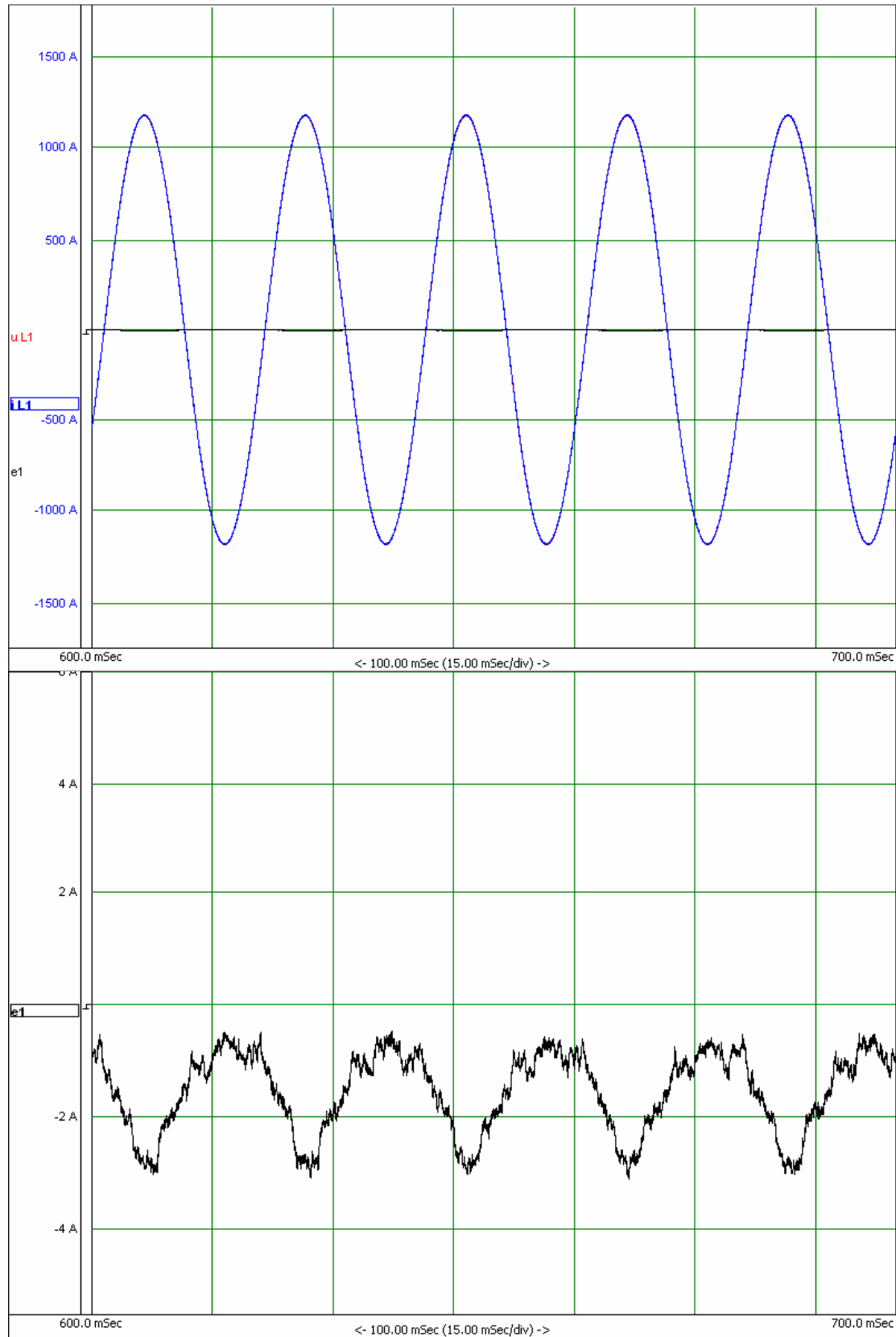
Şekil A.2.16 28.Test L1 Fazı Eğrileri



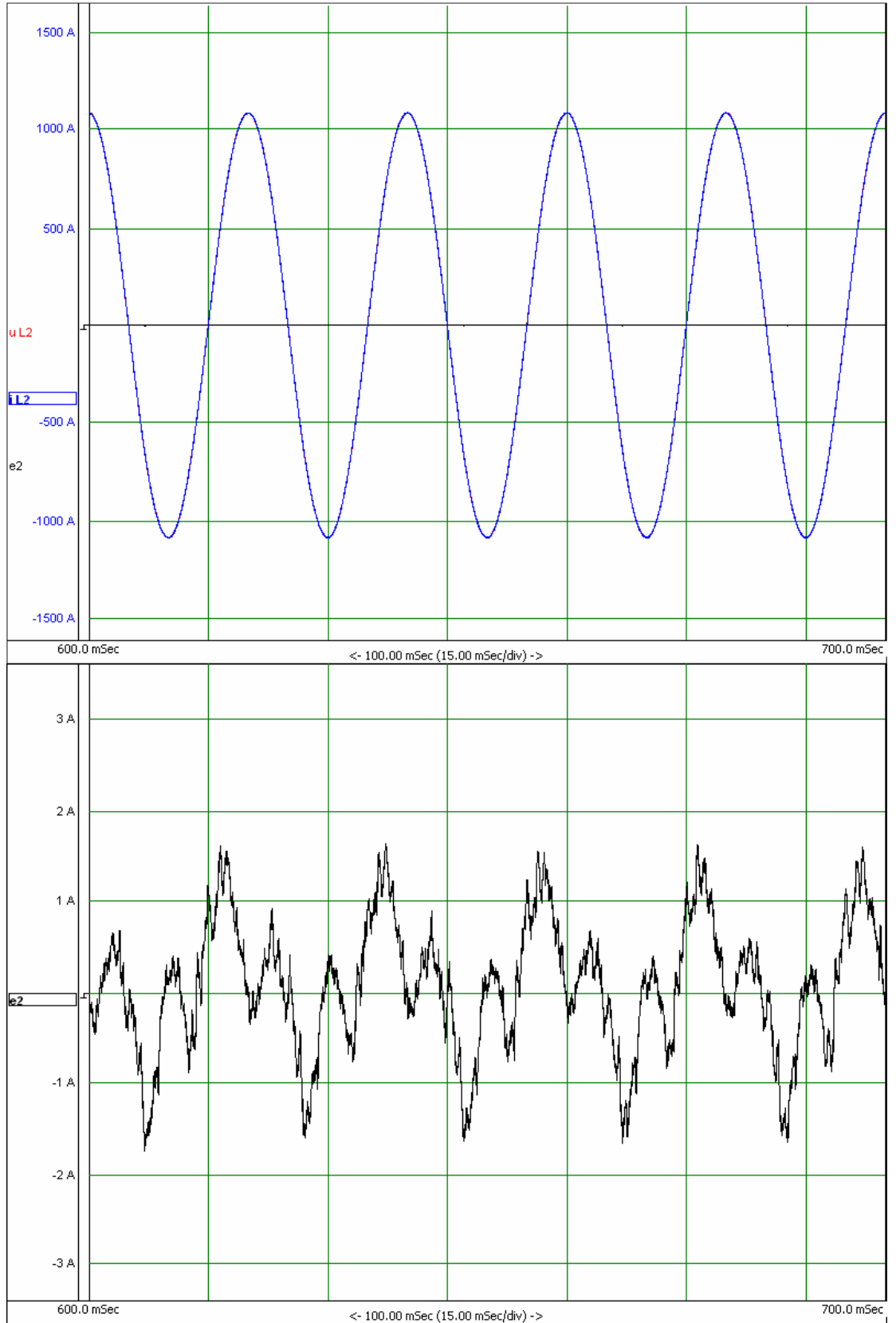
Şekil A.2.17 28.Test L2 Fazı Eğrileri



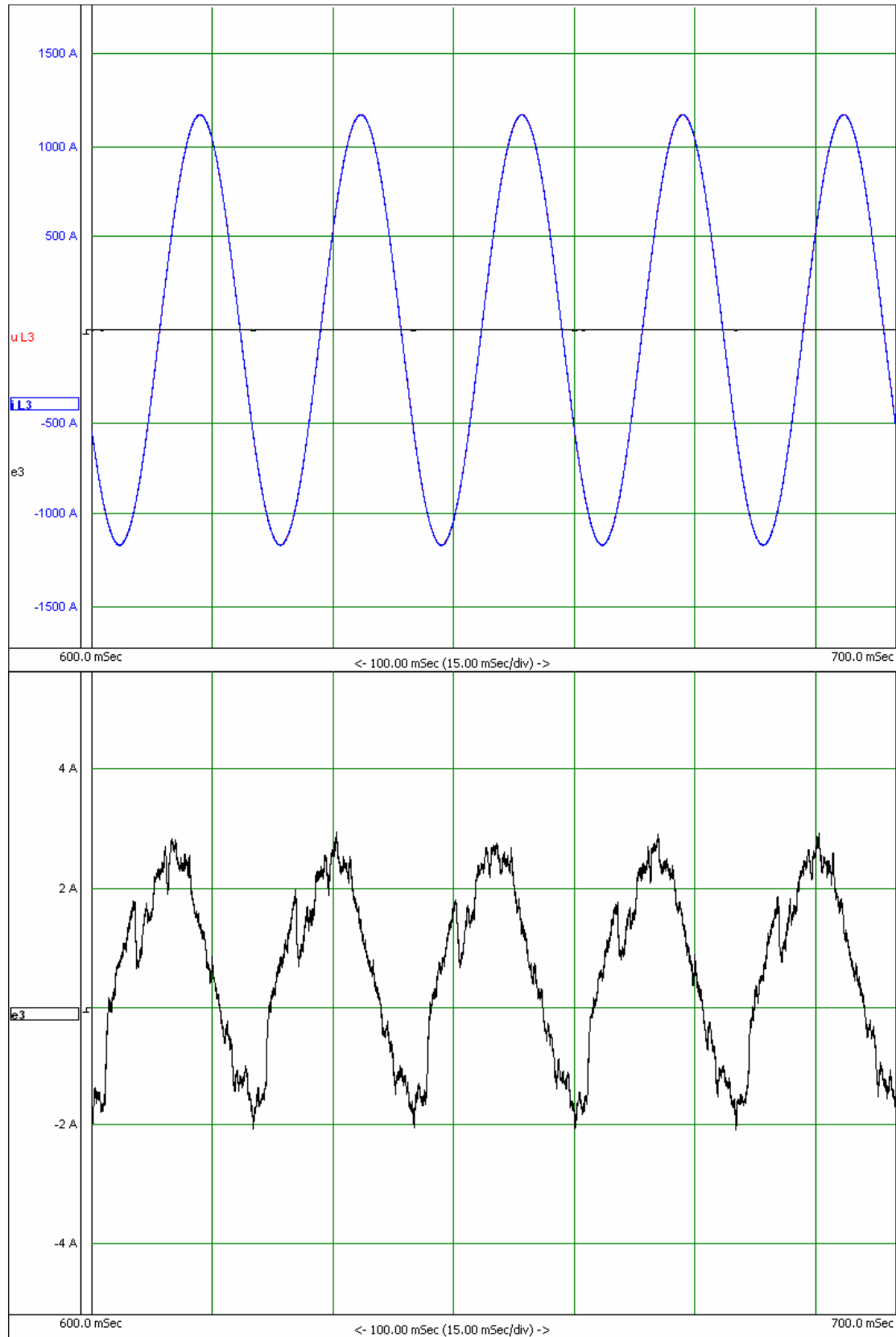
Şekil A.2.18 28.Test L3 Fazı Eğrileri



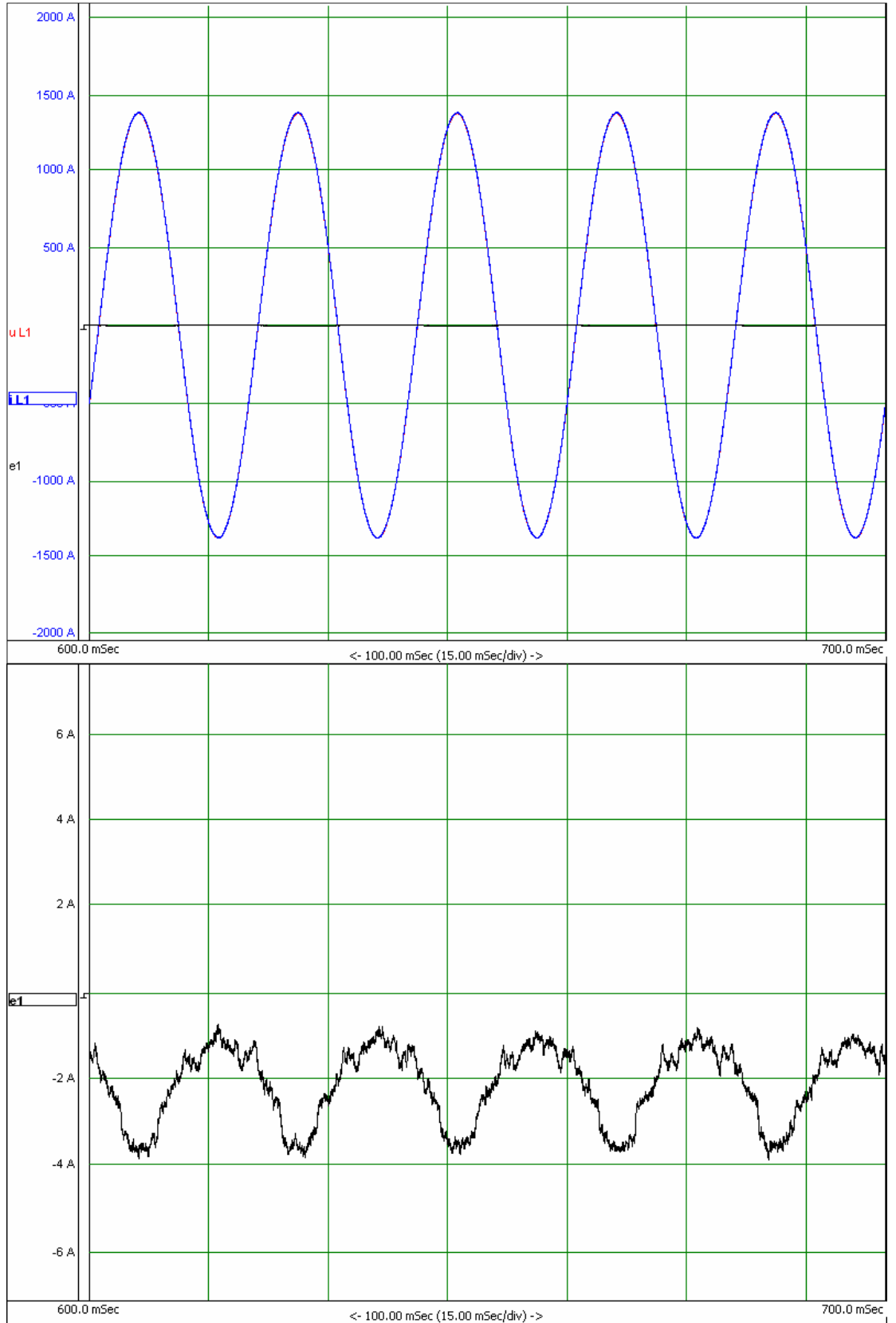
Şekil A.2.19 29.Test L1 Fazı Eğrileri



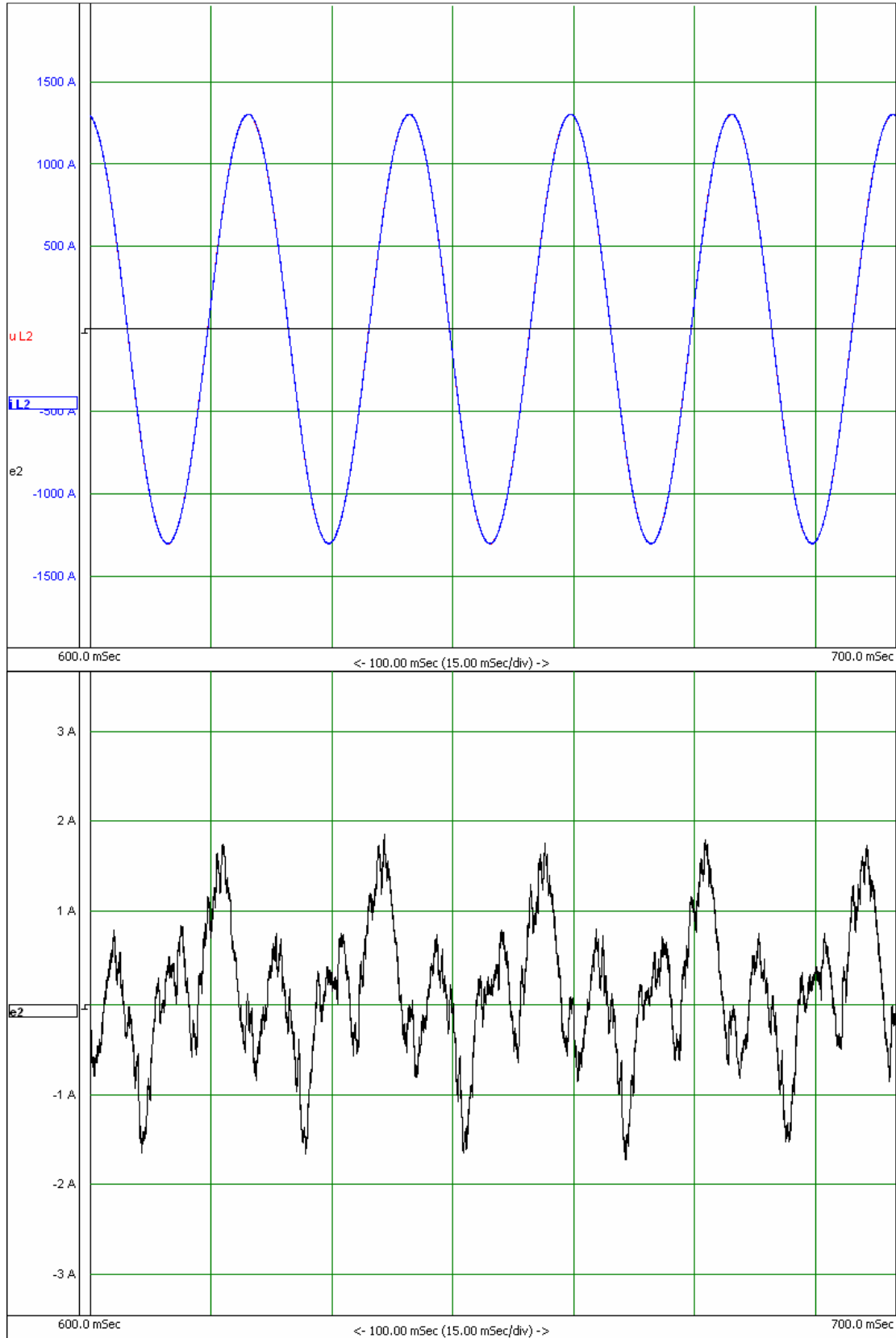
Şekil A.2.20 29.Test L2 Fazı Eğrileri



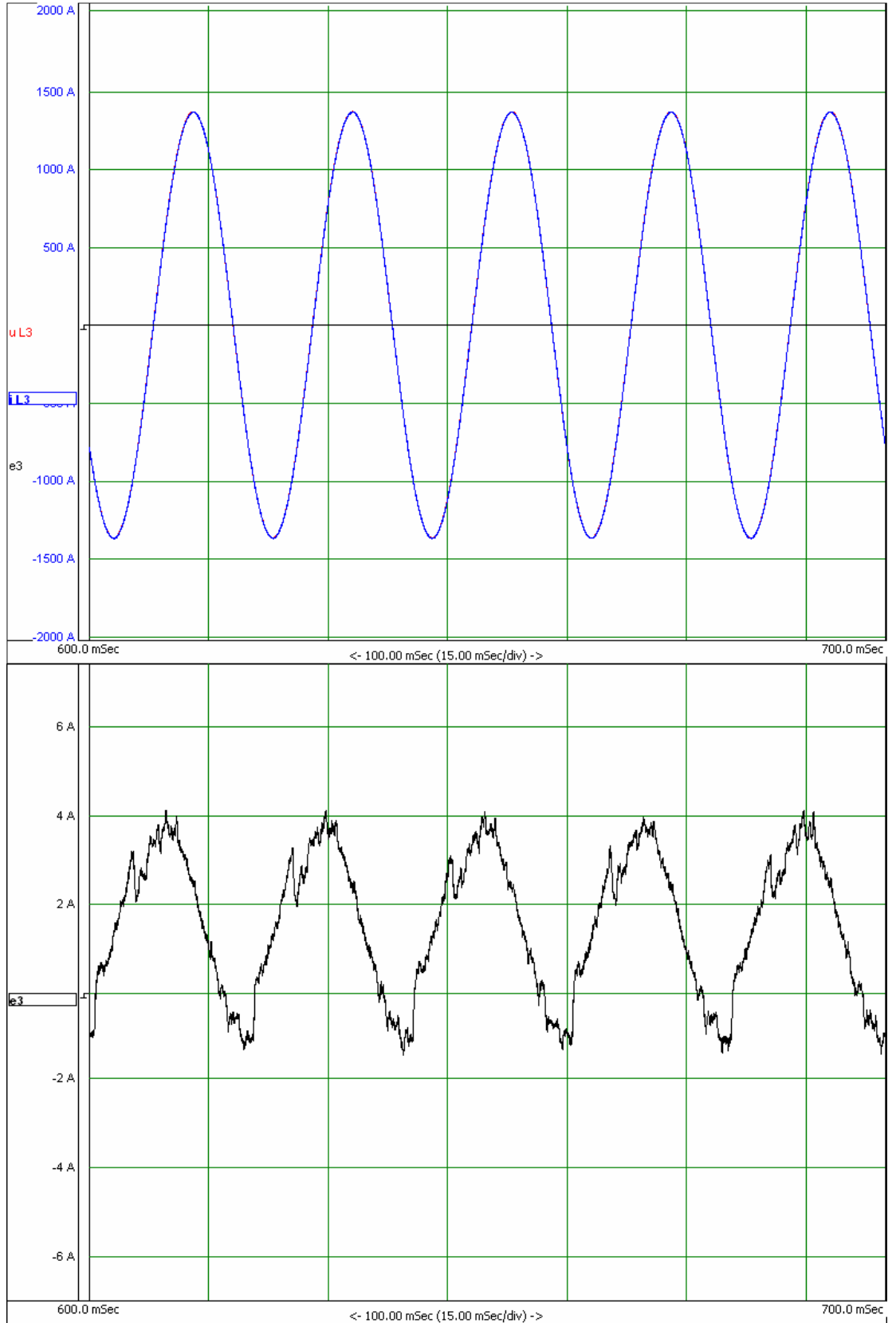
Şekil A.2.21 29.Test L3 Fazı Eğrileri



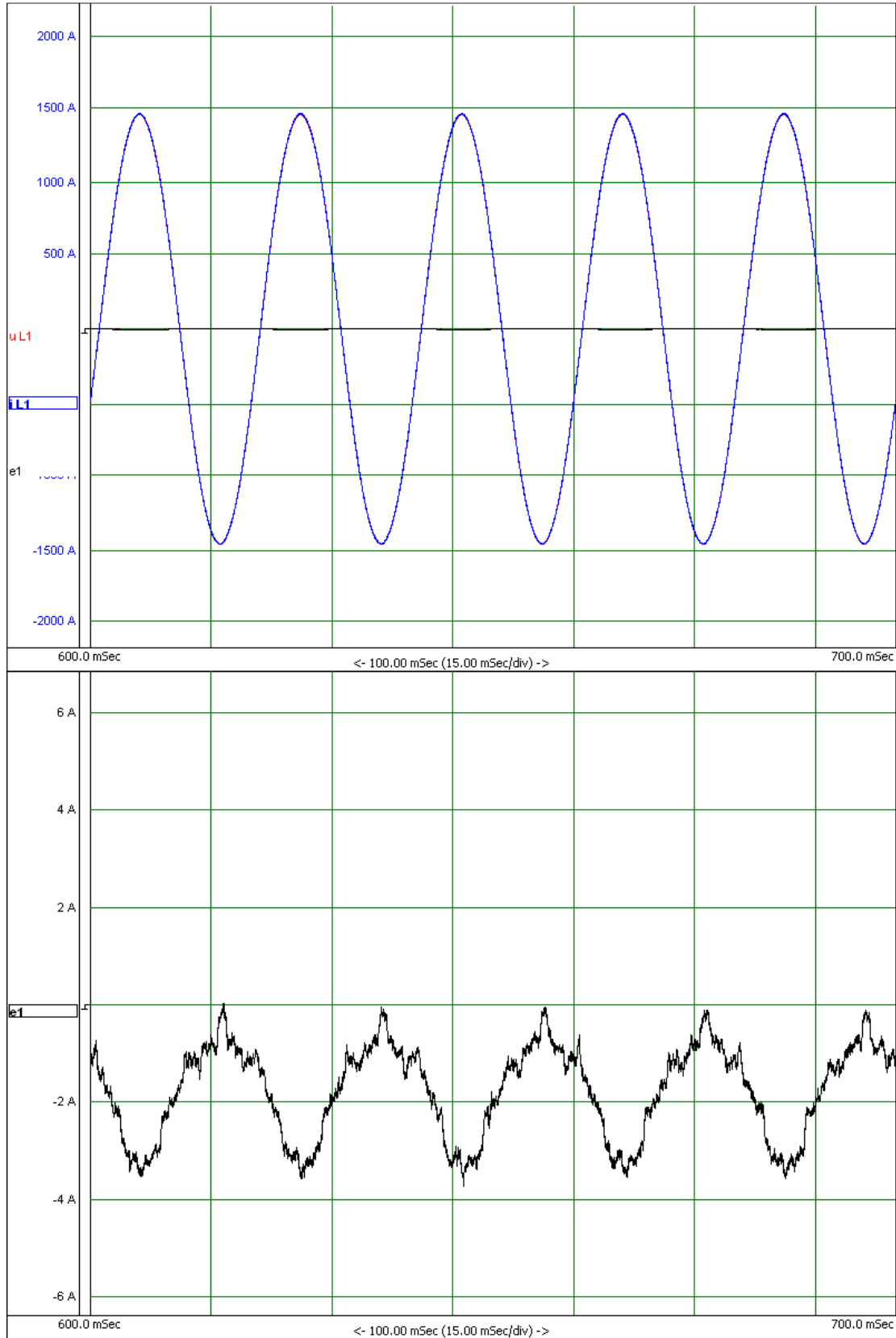
Şekil A.2.22 30.Test L1 Fazı Eğrileri



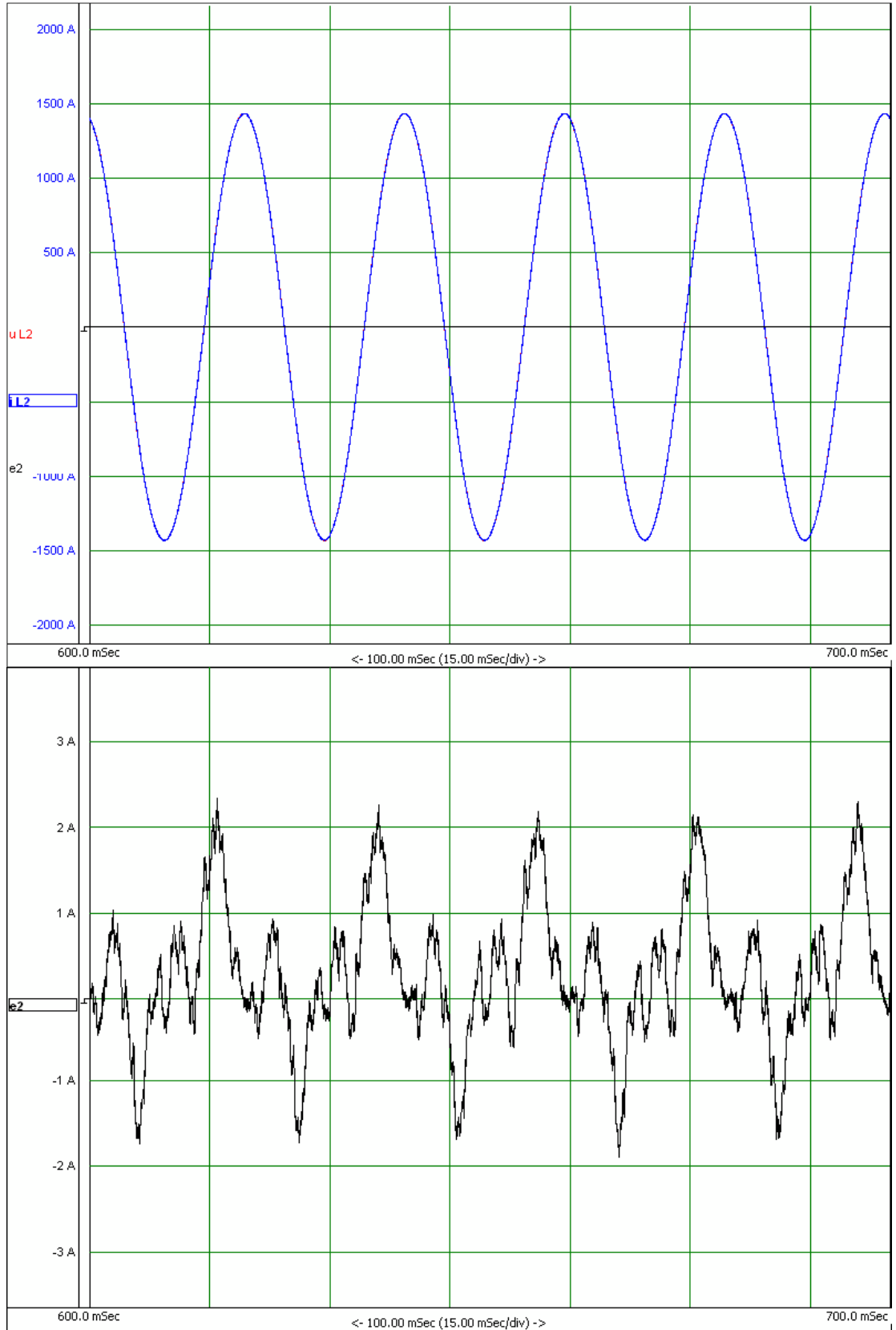
Şekil A.2.23 30.Test L2 Fazı Eğrileri



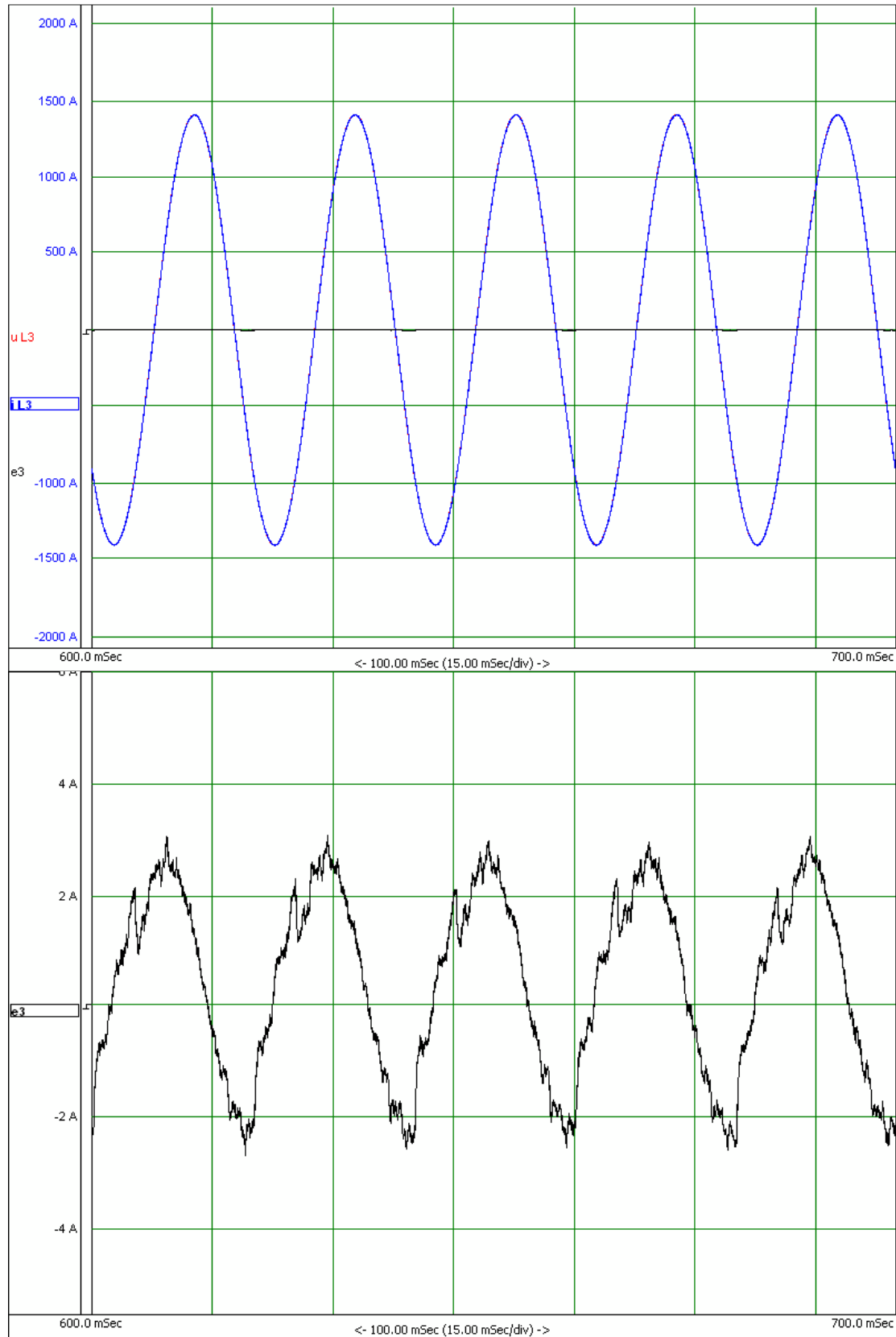
Şekil A.2.24 30.Test L3 Fazı Eğrileri



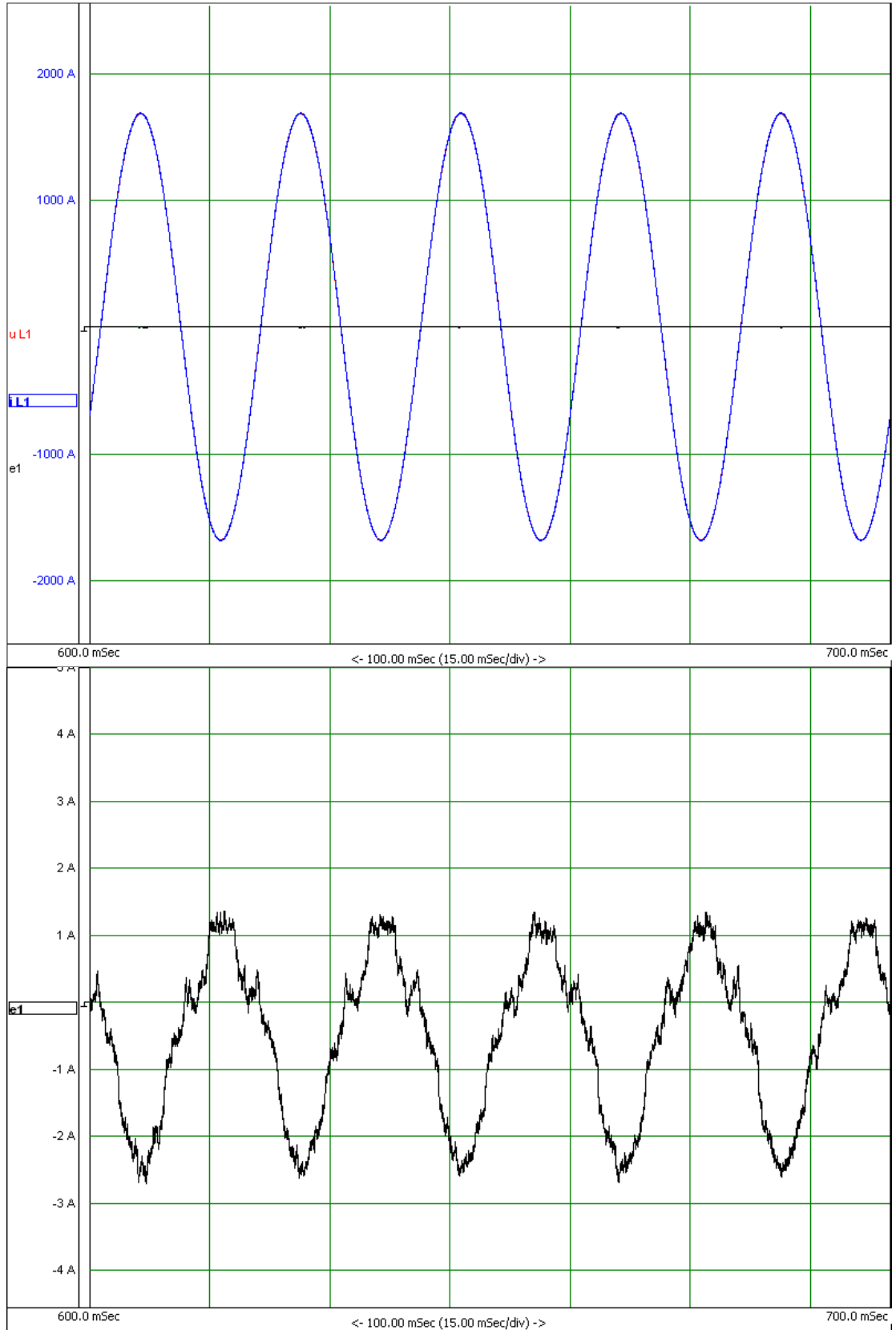
Şekil A.2.25 31.Test L1 Fazı Eğrileri



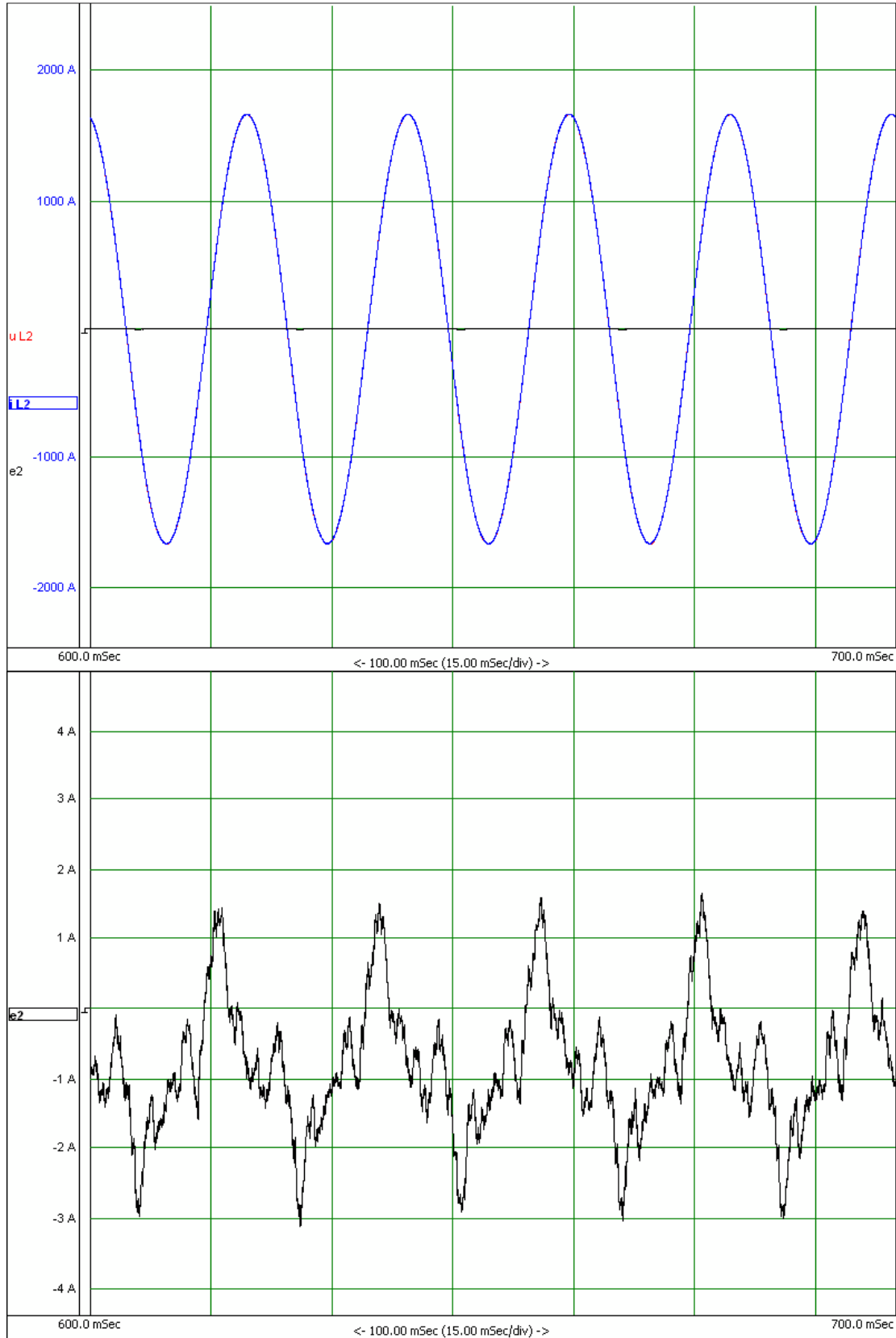
Şekil A.2.26 31.Test L2 Fazı Eğrileri



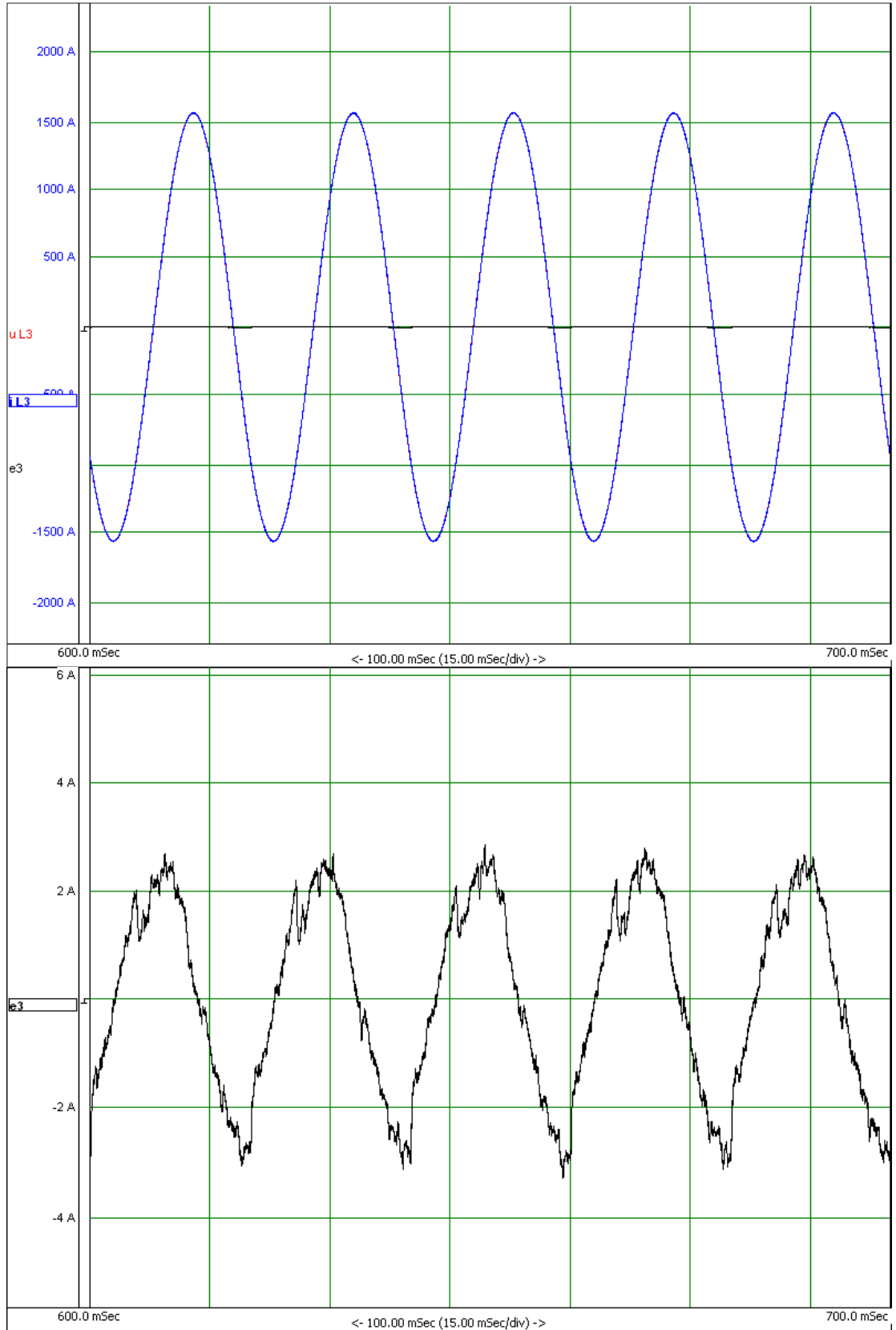
Şekil A.2.27 31.Test L3 Fazı Eğrileri



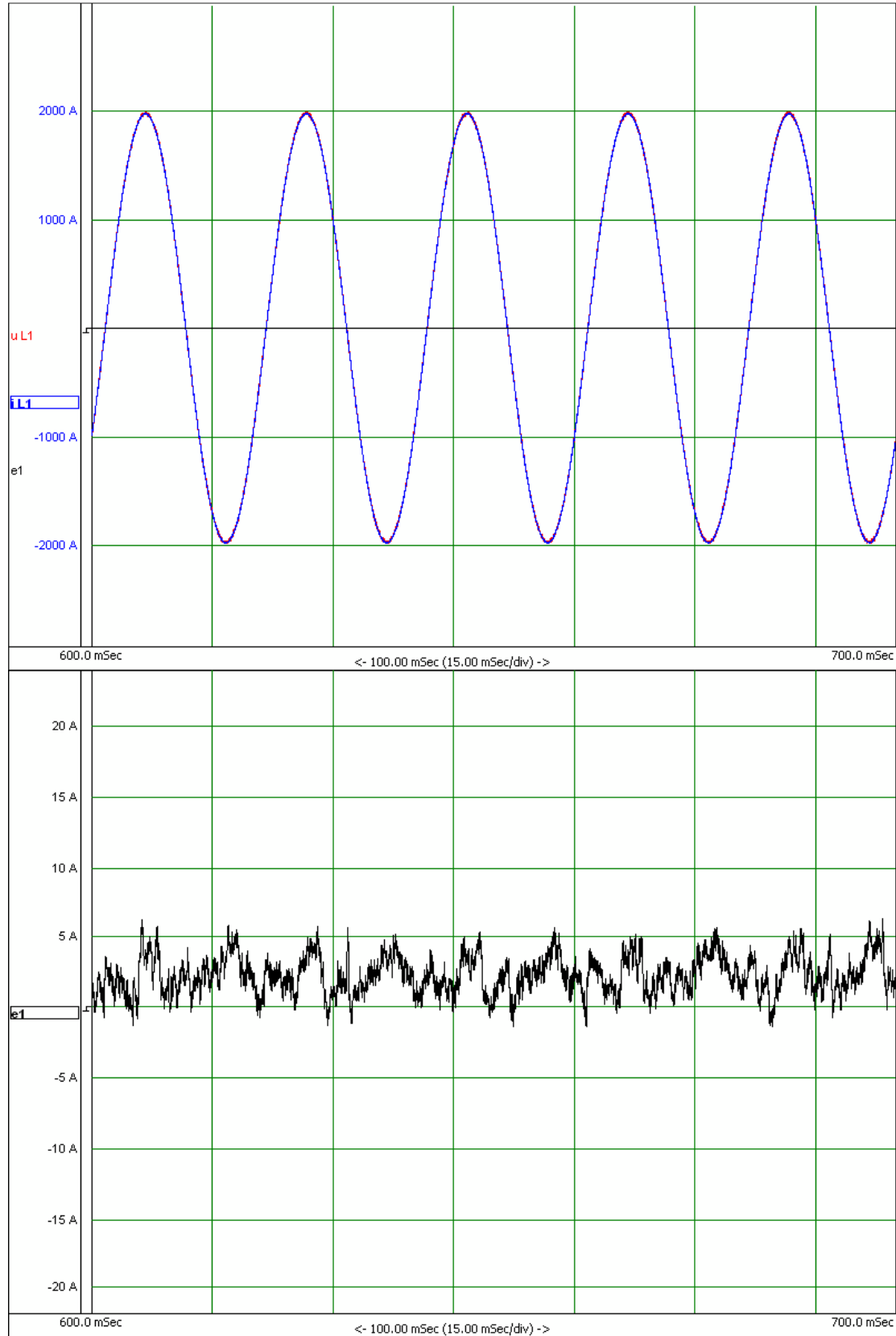
Şekil A.2.28 32.Test L1 Fazı Eğrileri



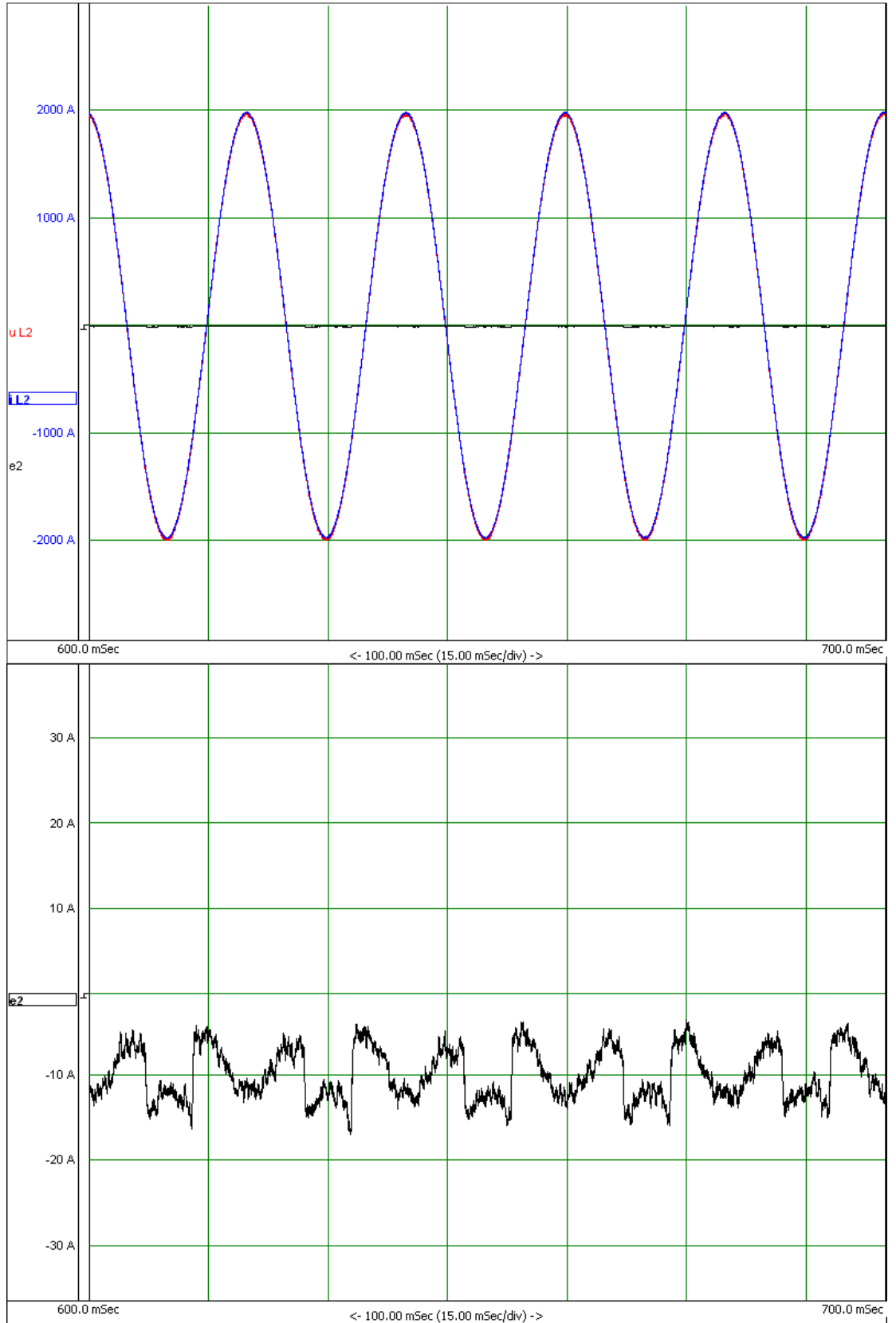
Şekil A.2.29 32.Test L2 Fazı Eğrileri



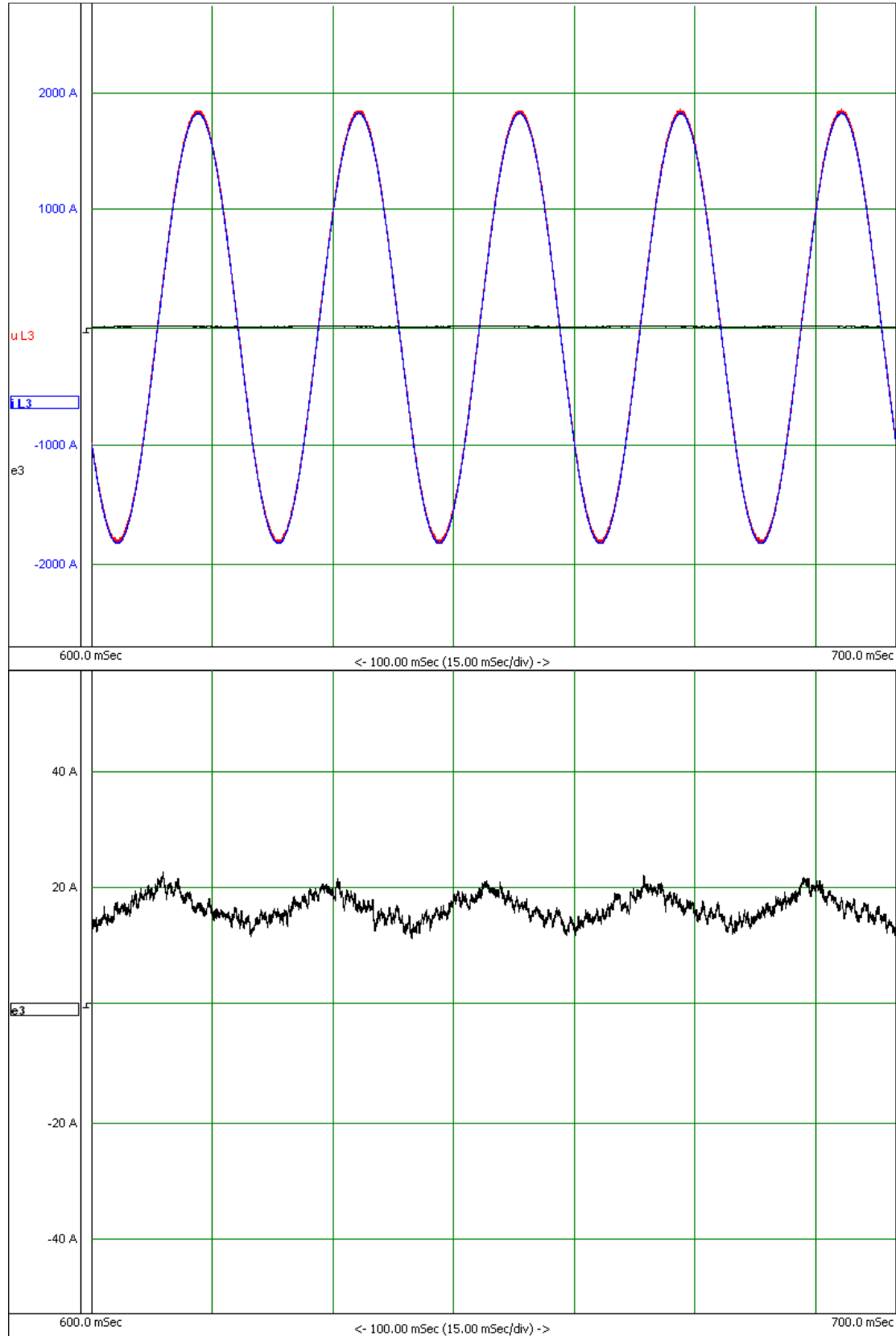
Şekil A.2.30 32.Test L3 Fazı Eğrileri



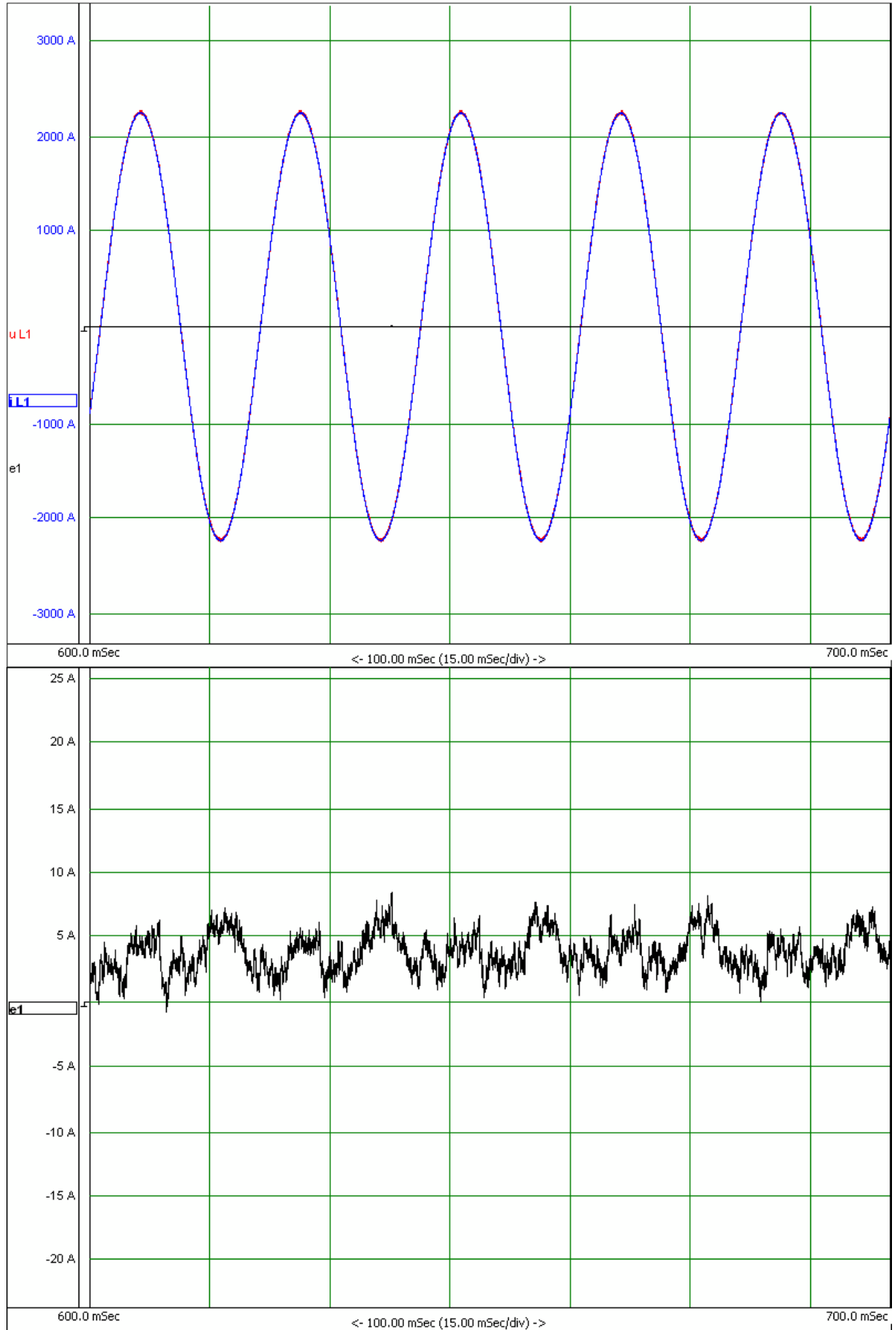
Şekil A.2.31 33.Test L1 Fazı Eğrileri



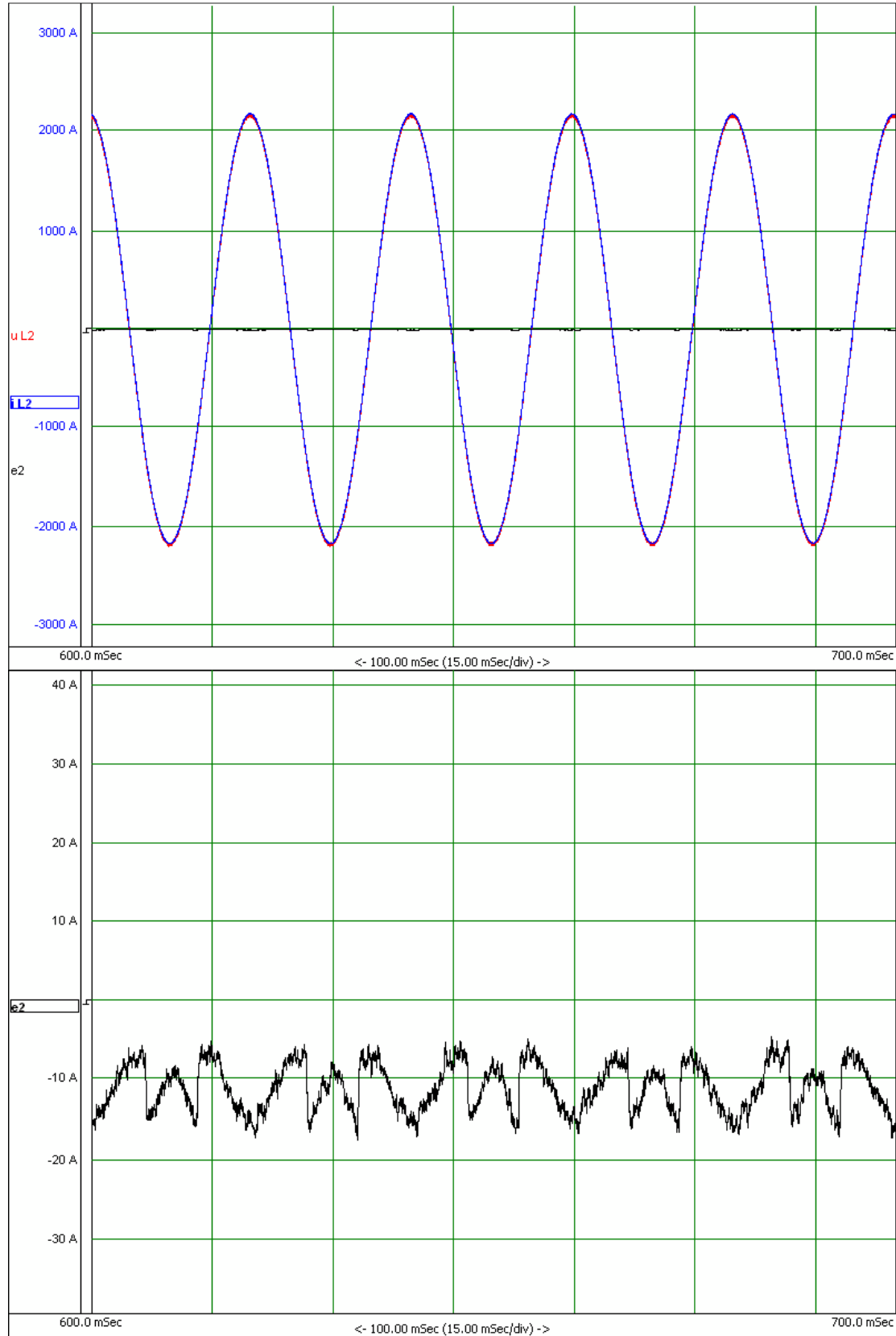
Şekil A.2.32 33.Test L2 Fazı Eğrileri



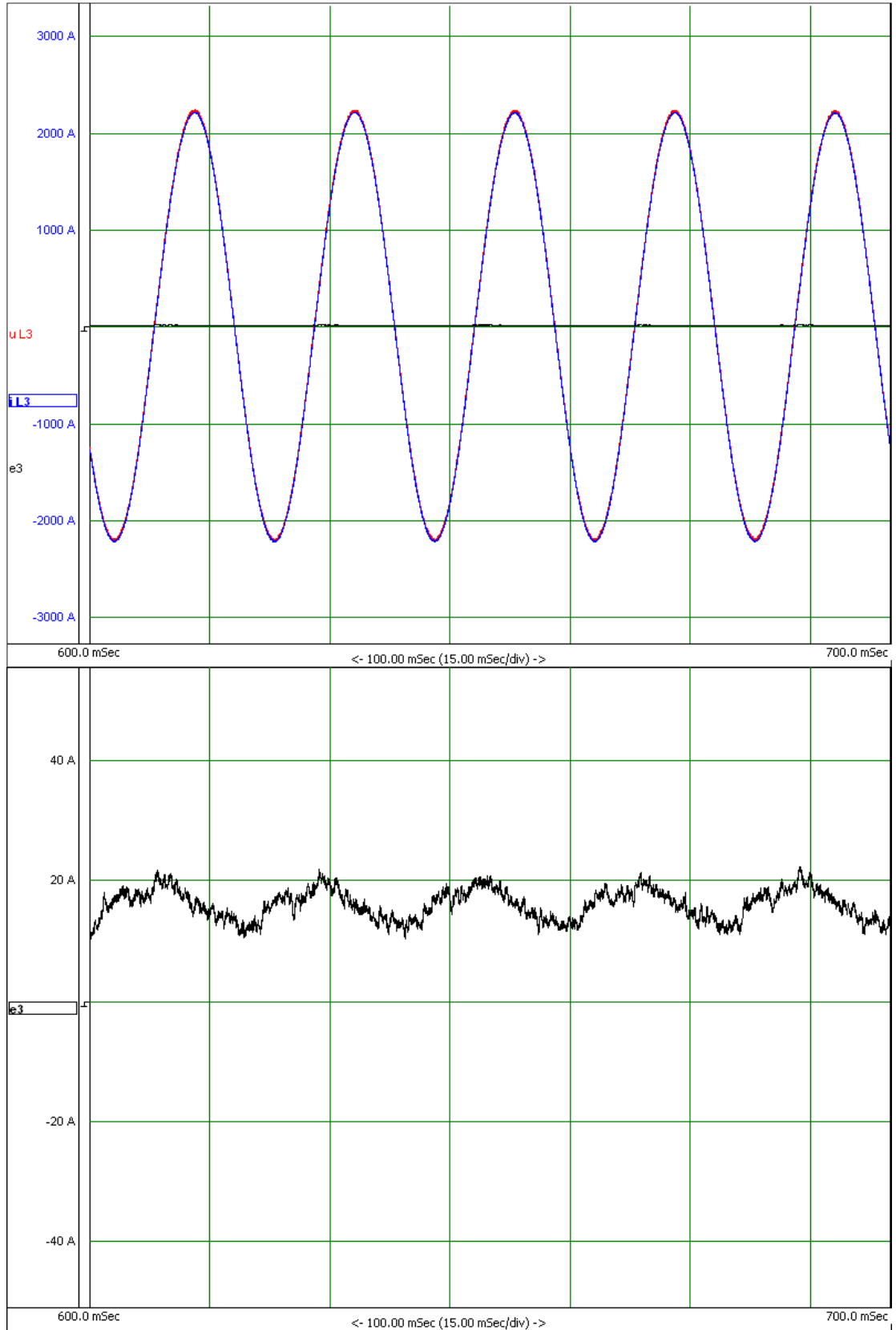
Şekil A.2.33 33.Test L3 Fazı Eğrileri



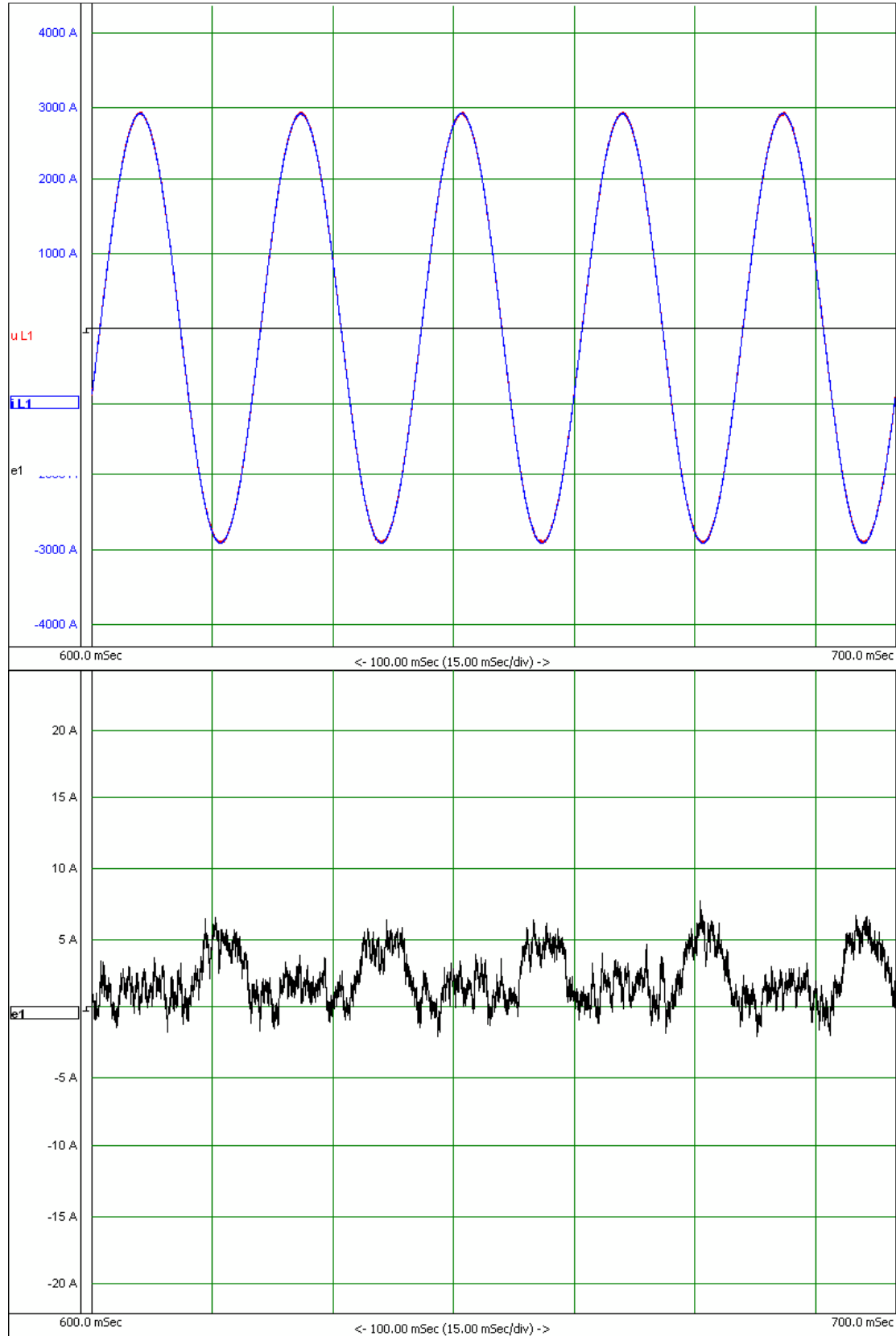
Şekil A.2.34 34.Test L1 Fazı Eğrileri



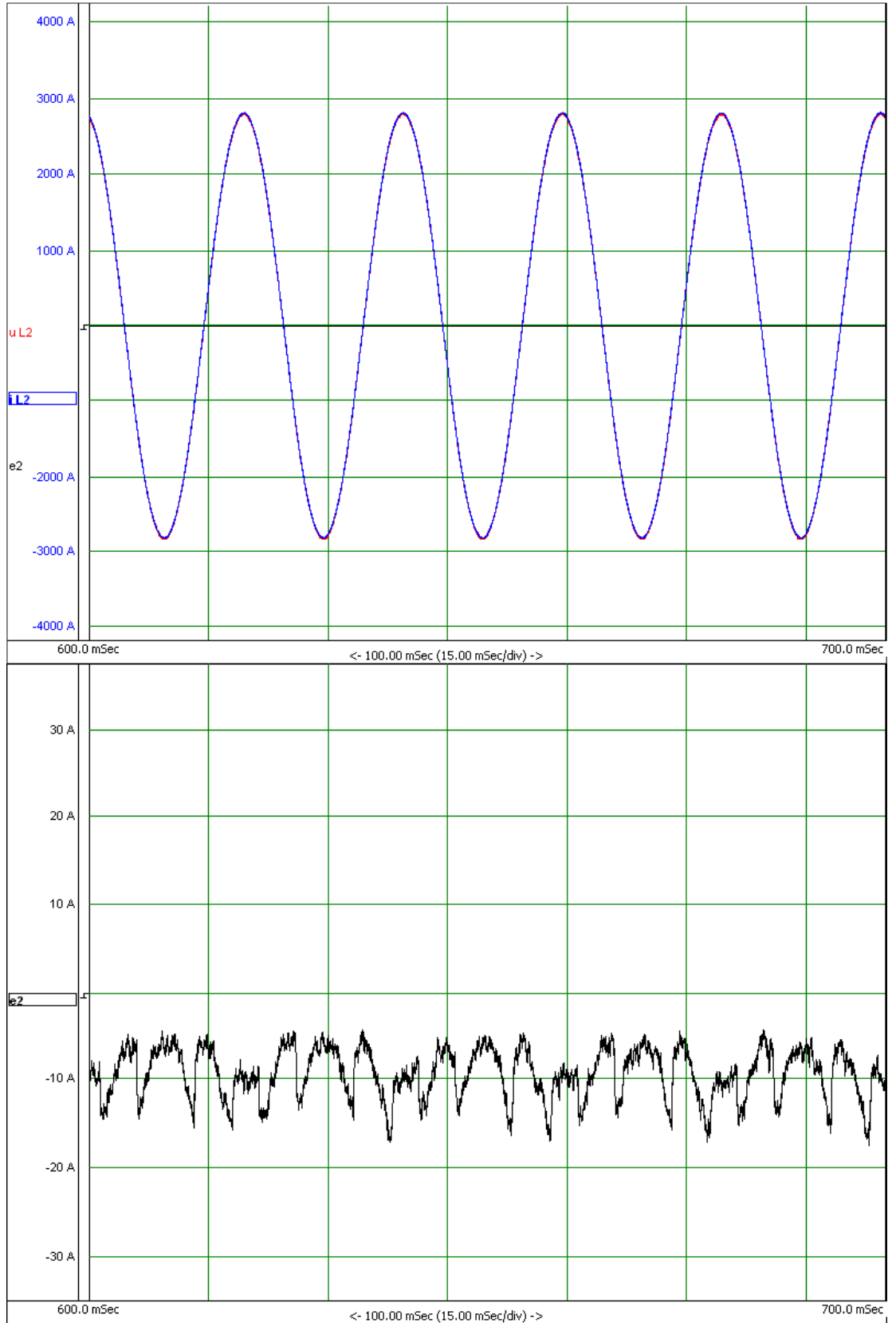
Şekil A.2.35 34.Test L2 Fazı Eğrileri



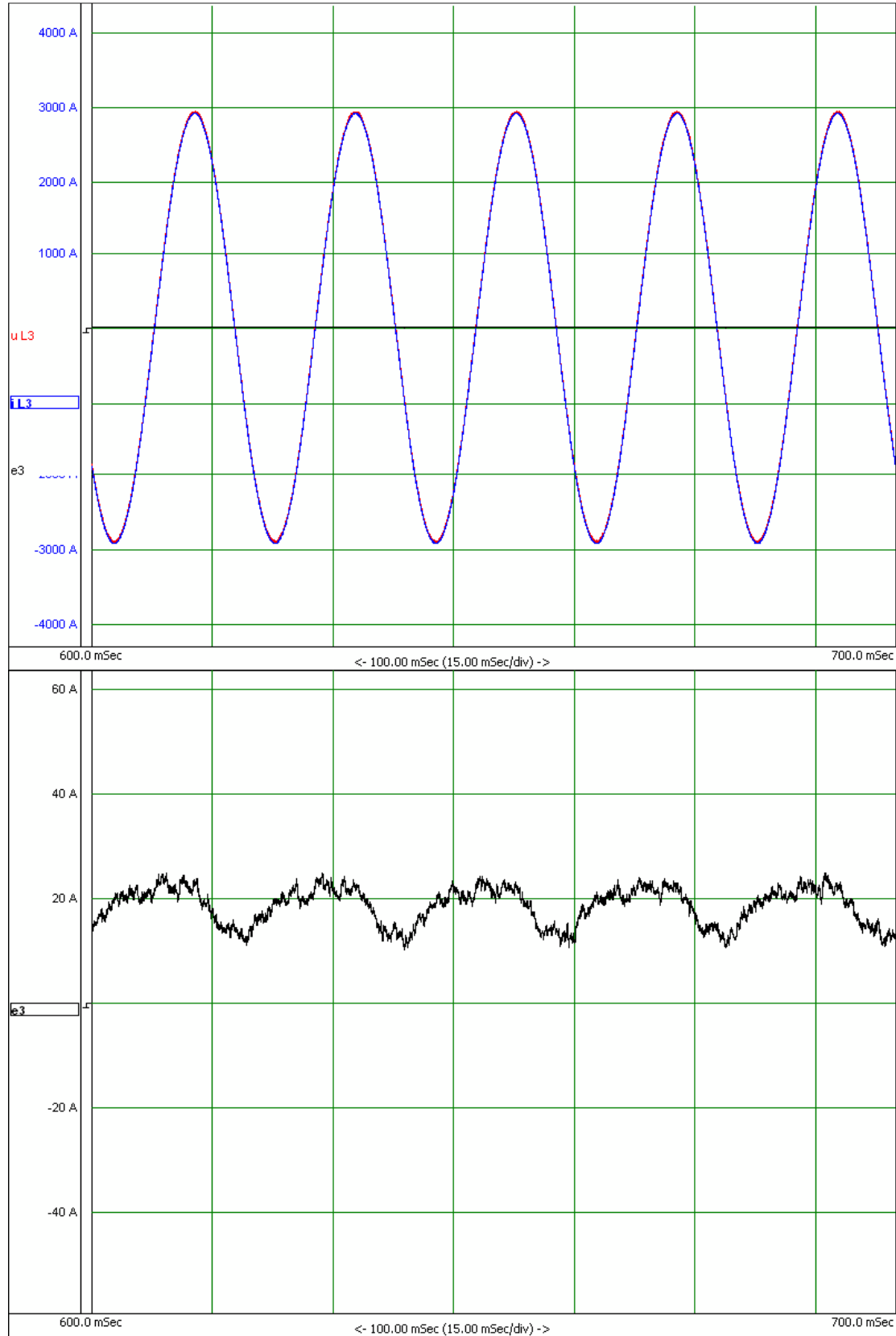
Şekil A.2.36 34.Test L3 Fazı Eğrileri



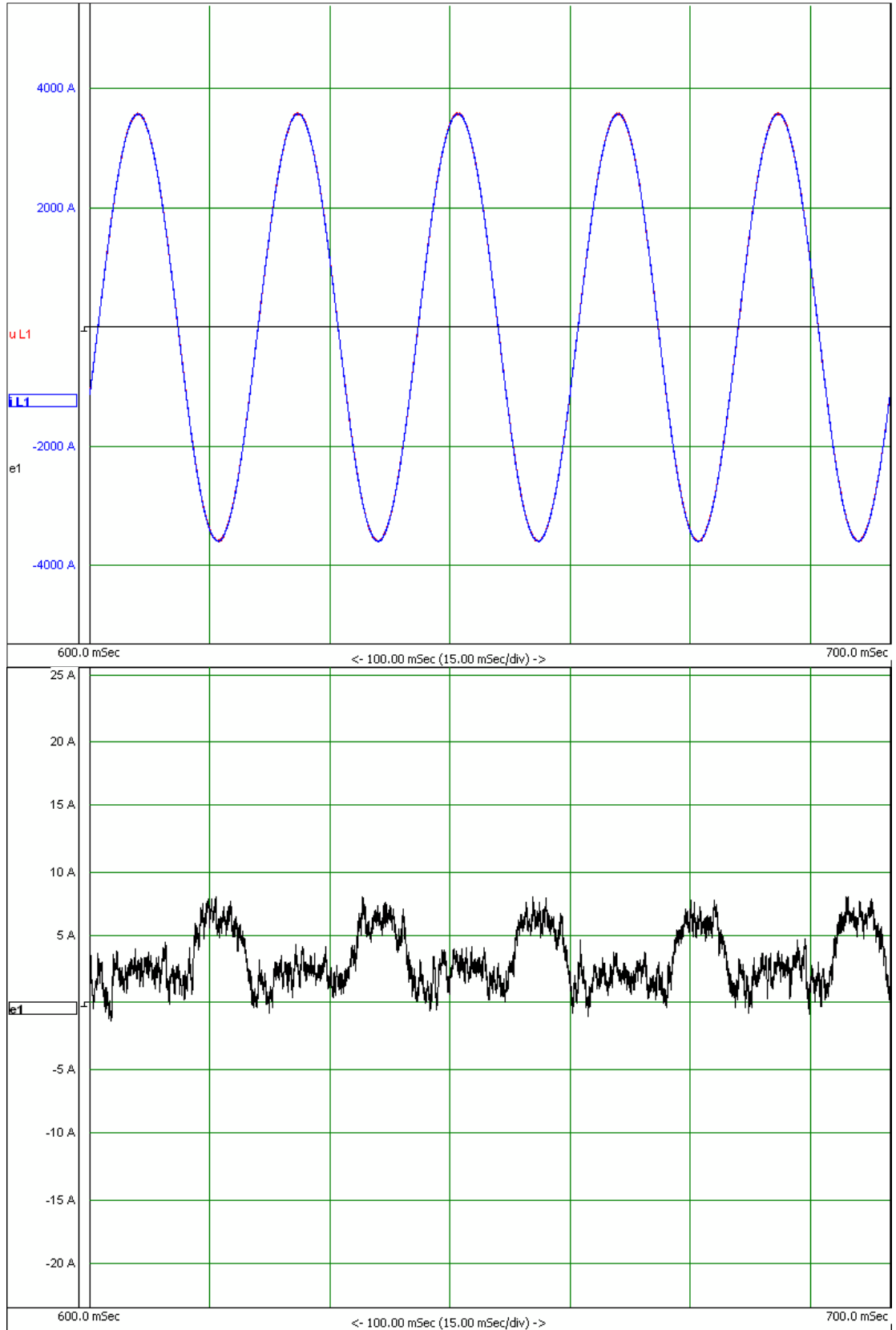
Şekil A.2.37 35.Test L1 Fazı Eğrileri



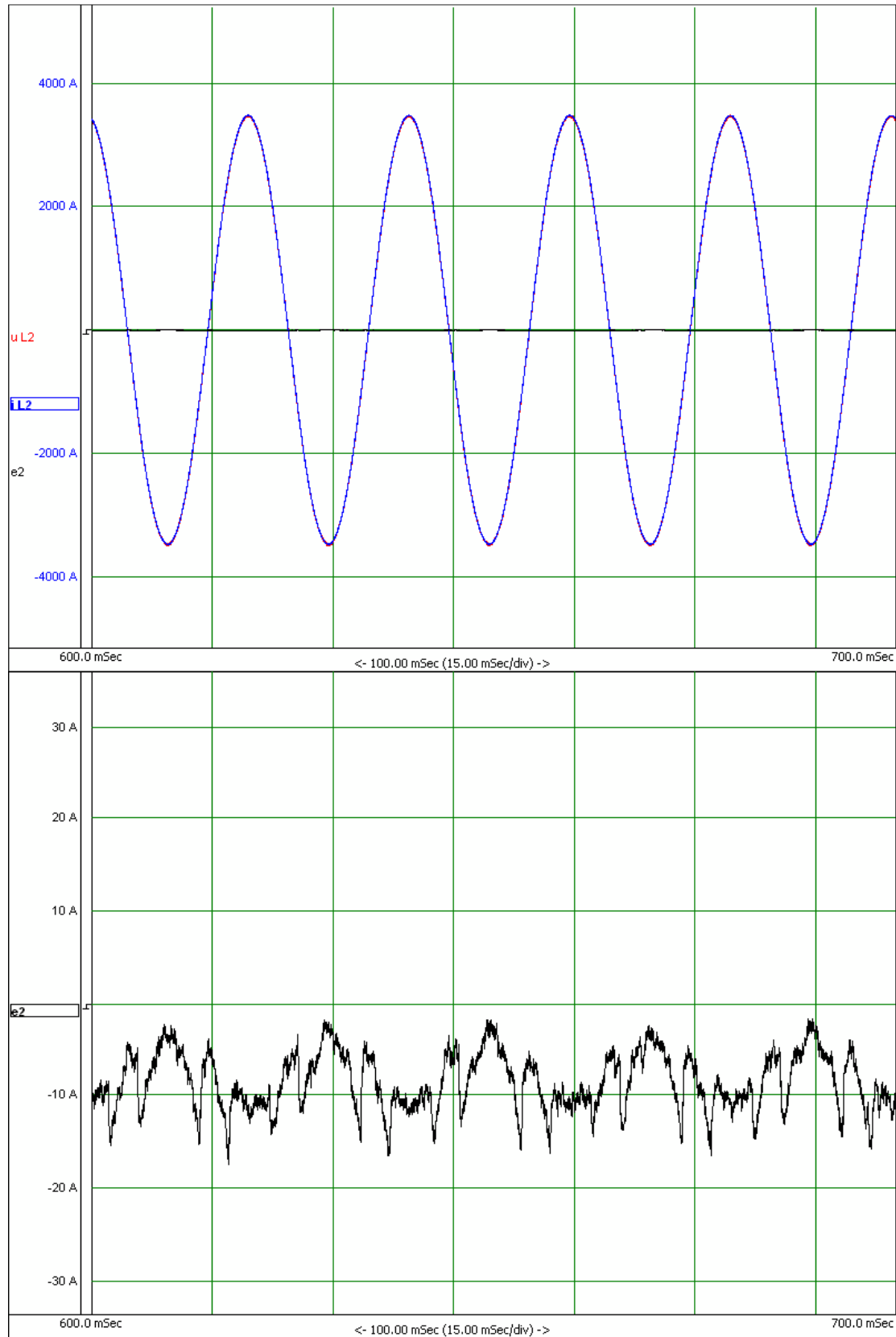
Şekil A.2.38 35.Test L2 Fazı Eğrileri



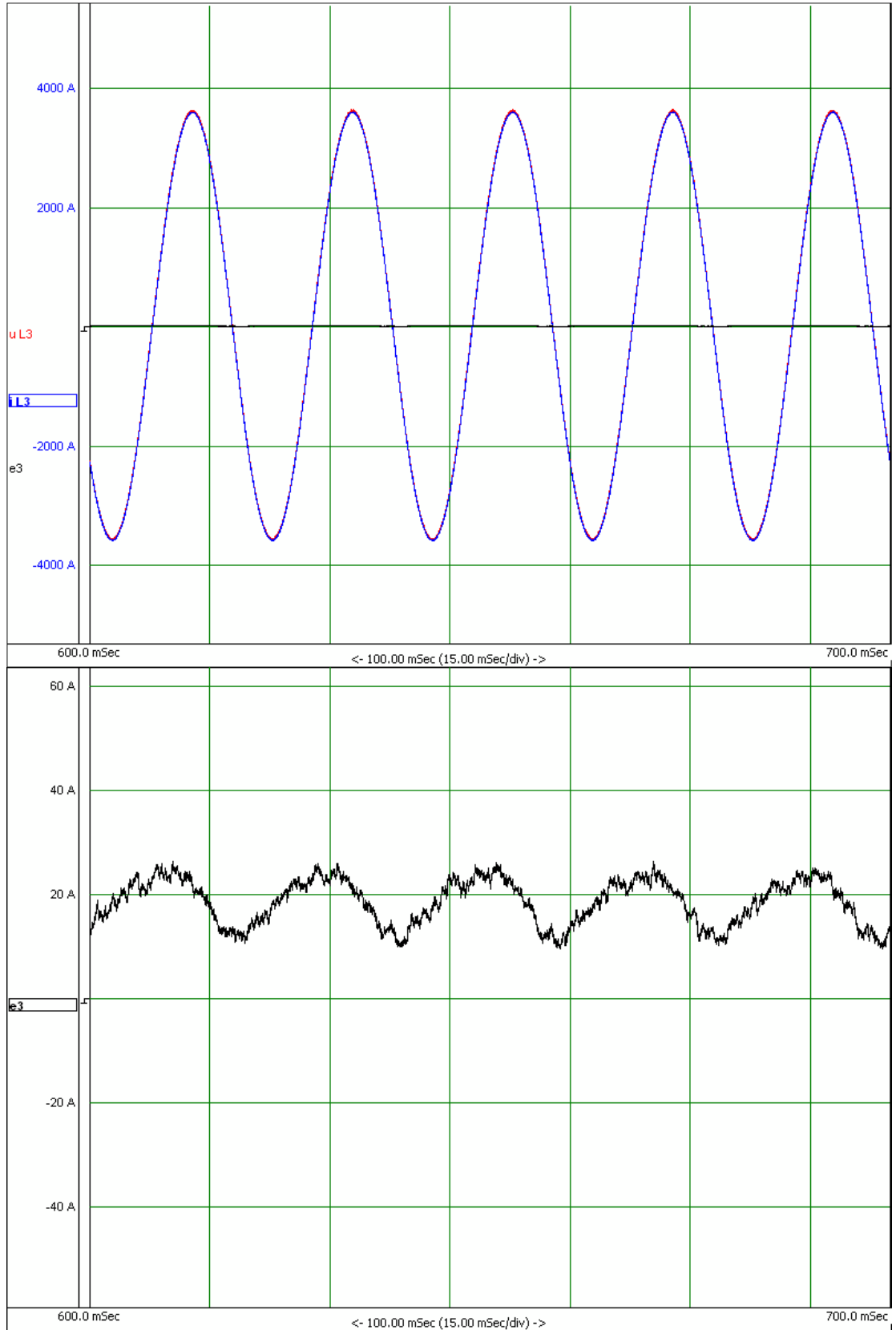
Şekil A.2.39 35.Test L3 Fazı Eğrileri



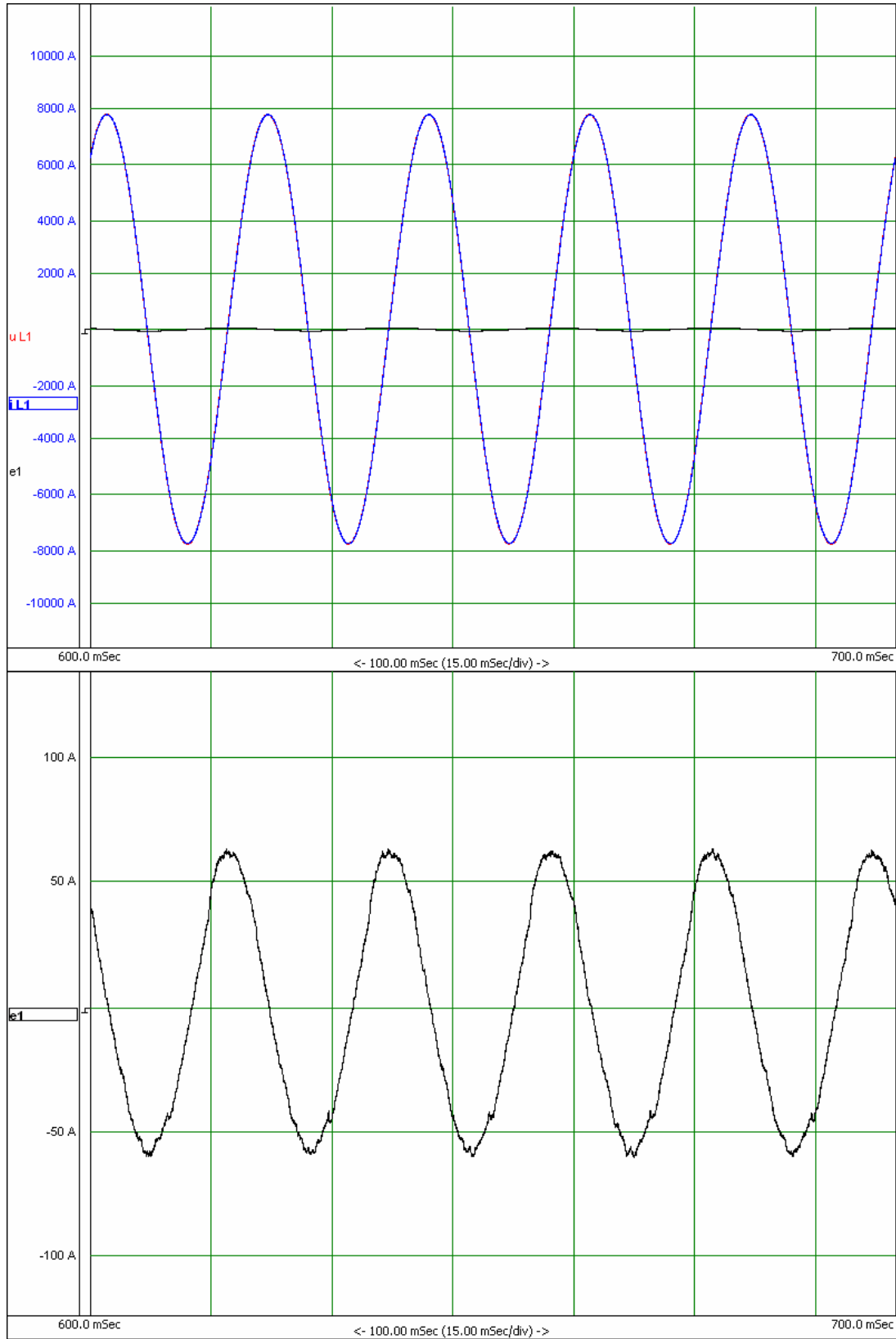
Şekil A.2.40 36.Test L1 Fazı Eğrileri



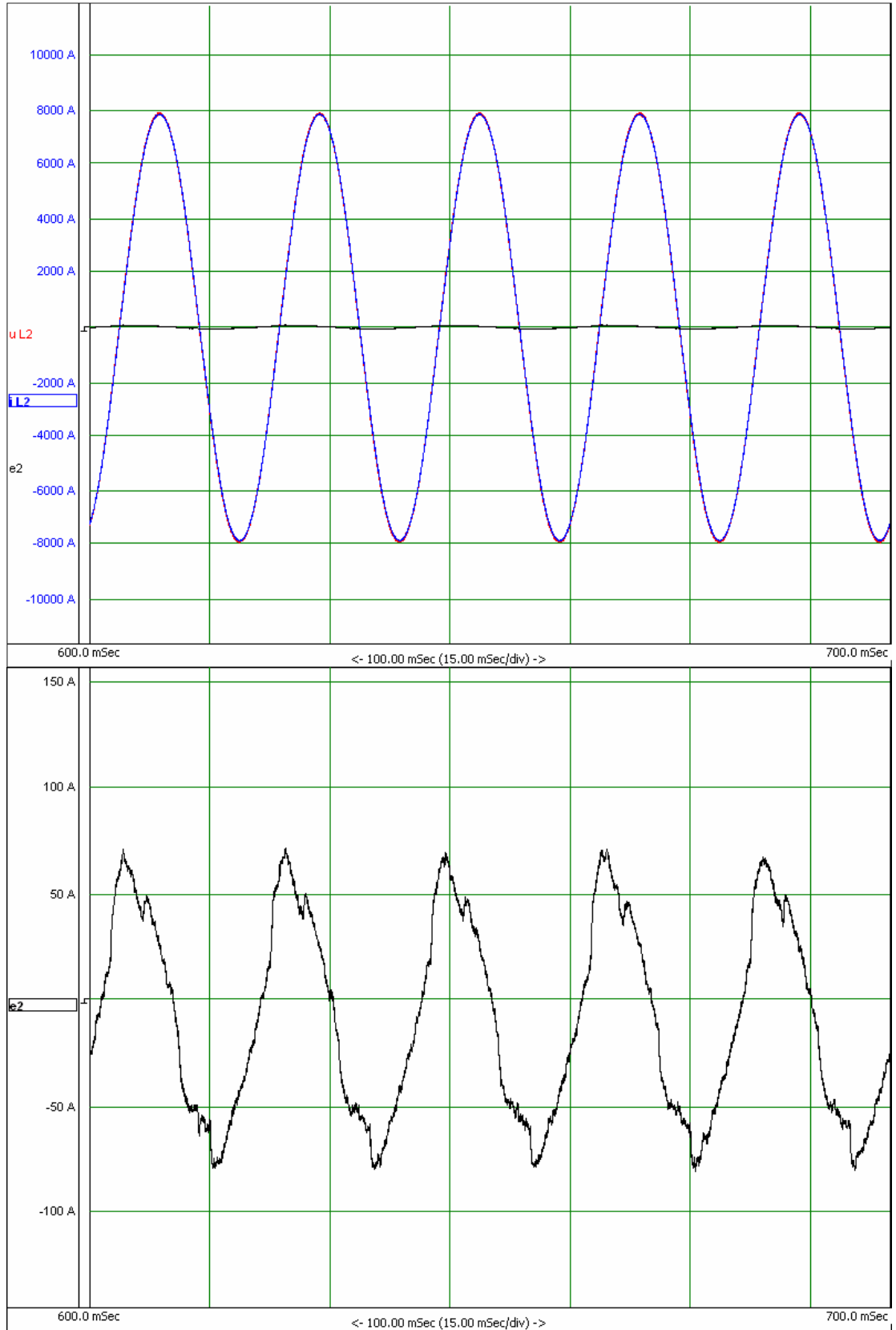
Şekil A.2.41 36.Test L2 Fazı Eğrileri



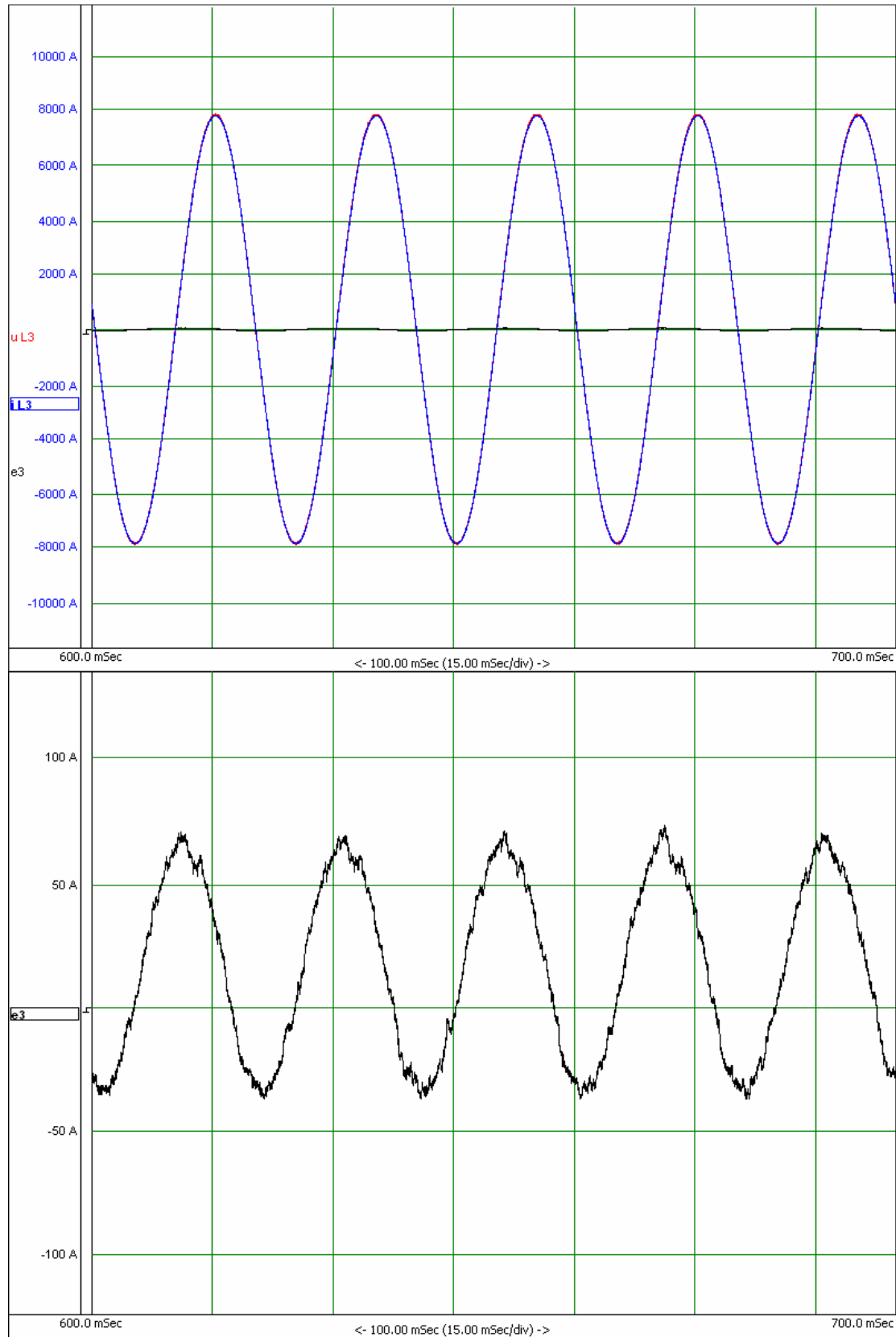
Şekil A.2.42 36.Test L3 Fazı Eğrileri



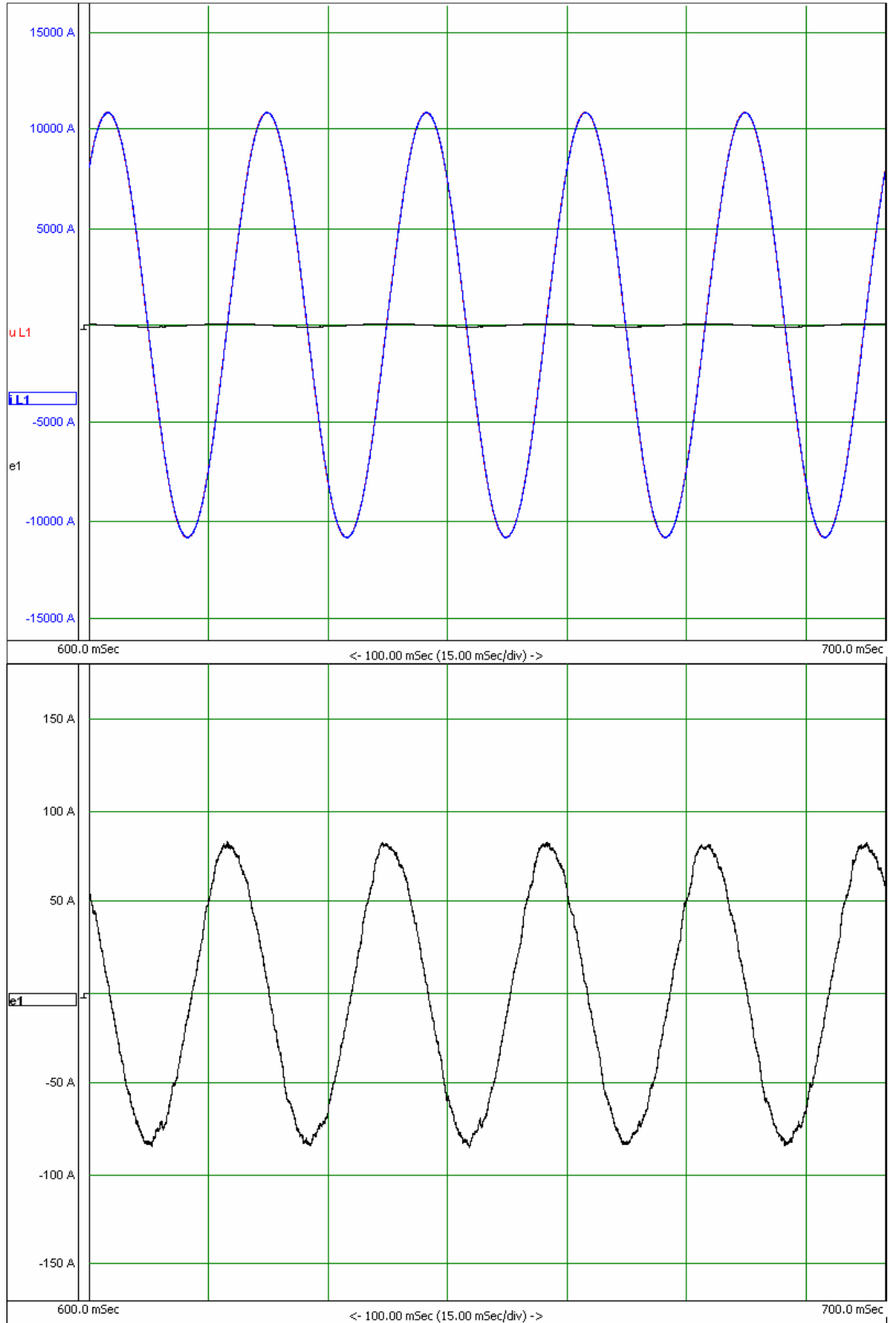
Şekil A.2.43 37.Test L1 Fazı Eğrileri



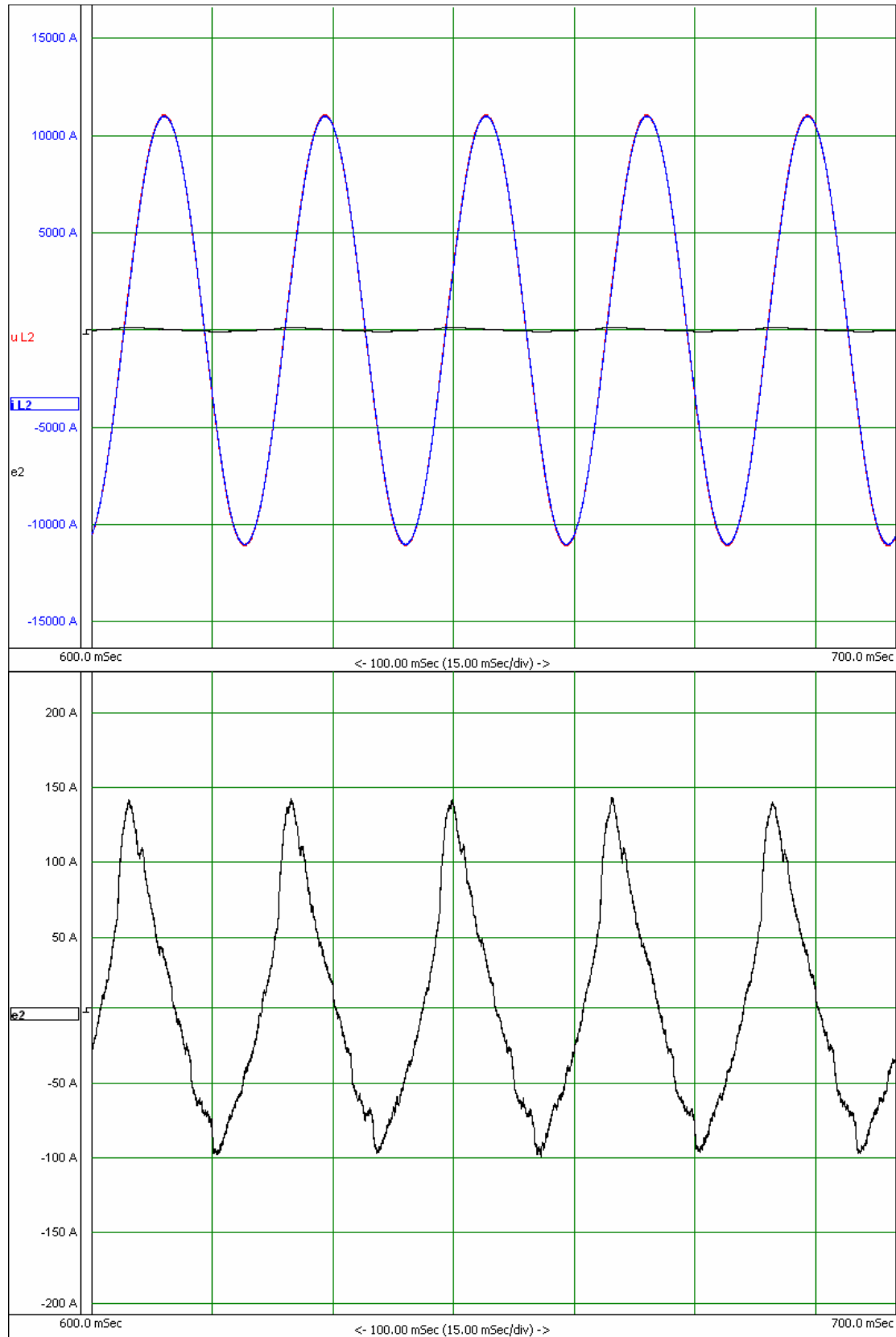
Şekil A.2.44 37.Test L2 Fazı Eğrileri



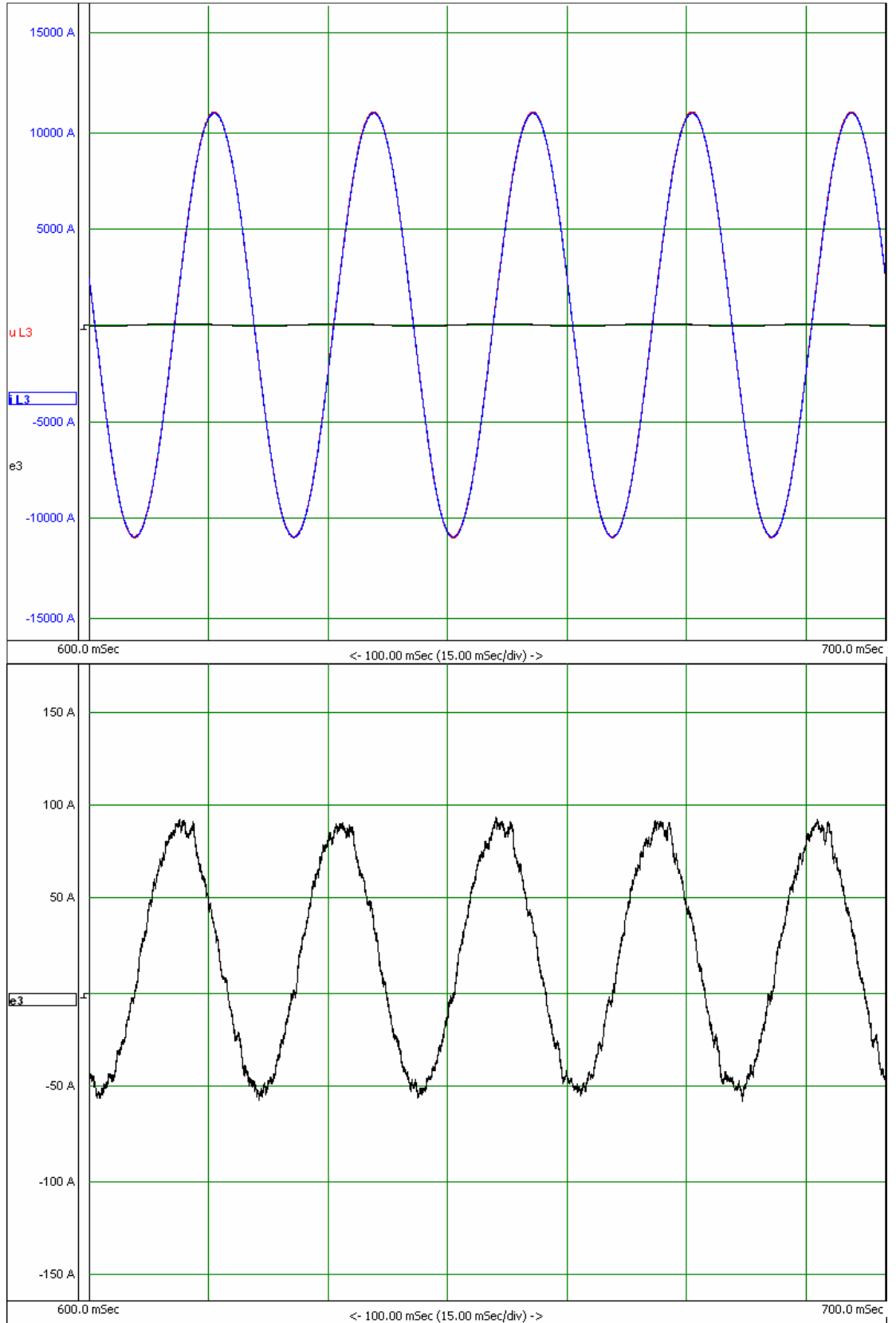
Şekil A.2.45 37.Test L3 Fazı Eğrileri



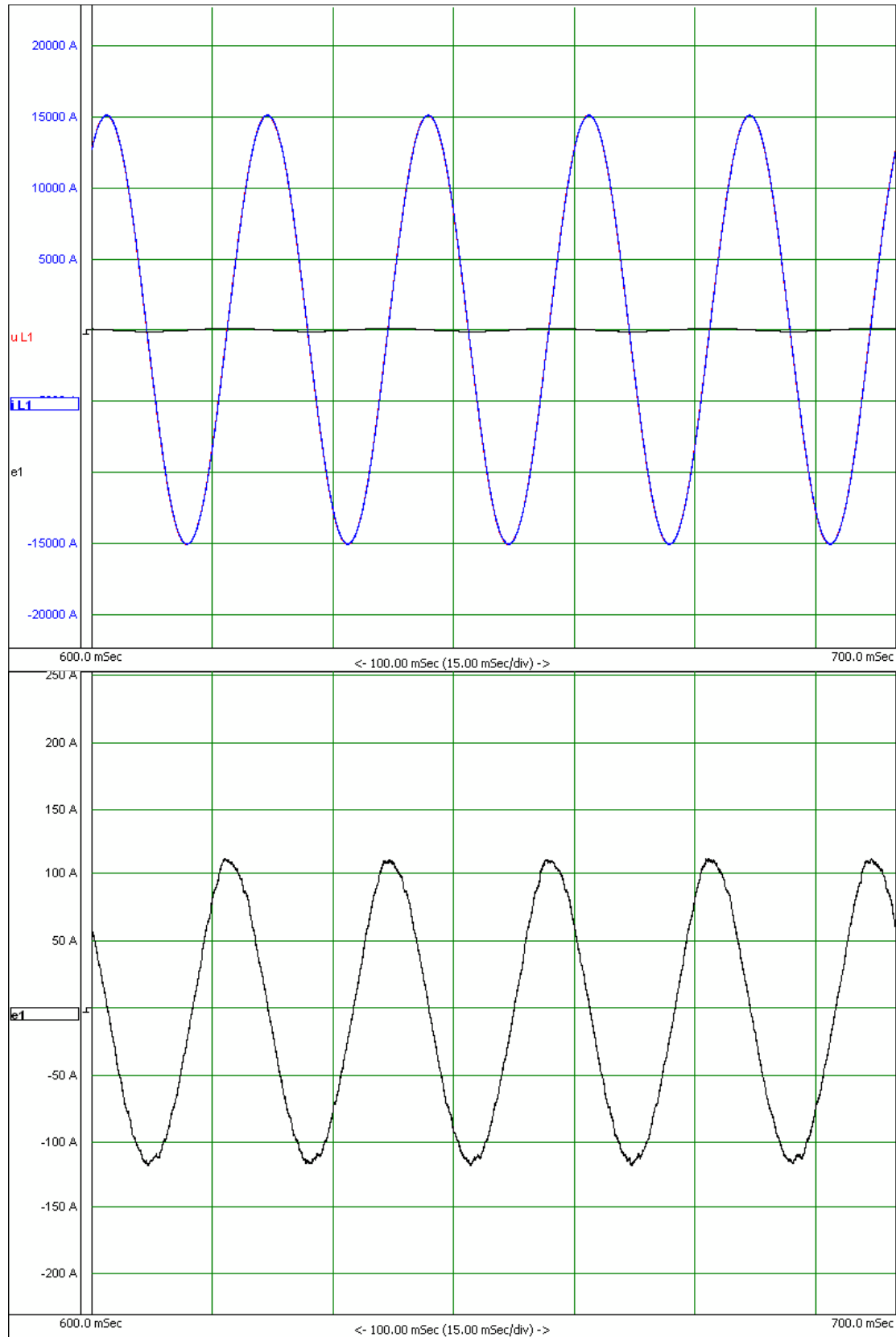
Şekil A.2.46 38.Test L1 Fazı Eğrileri



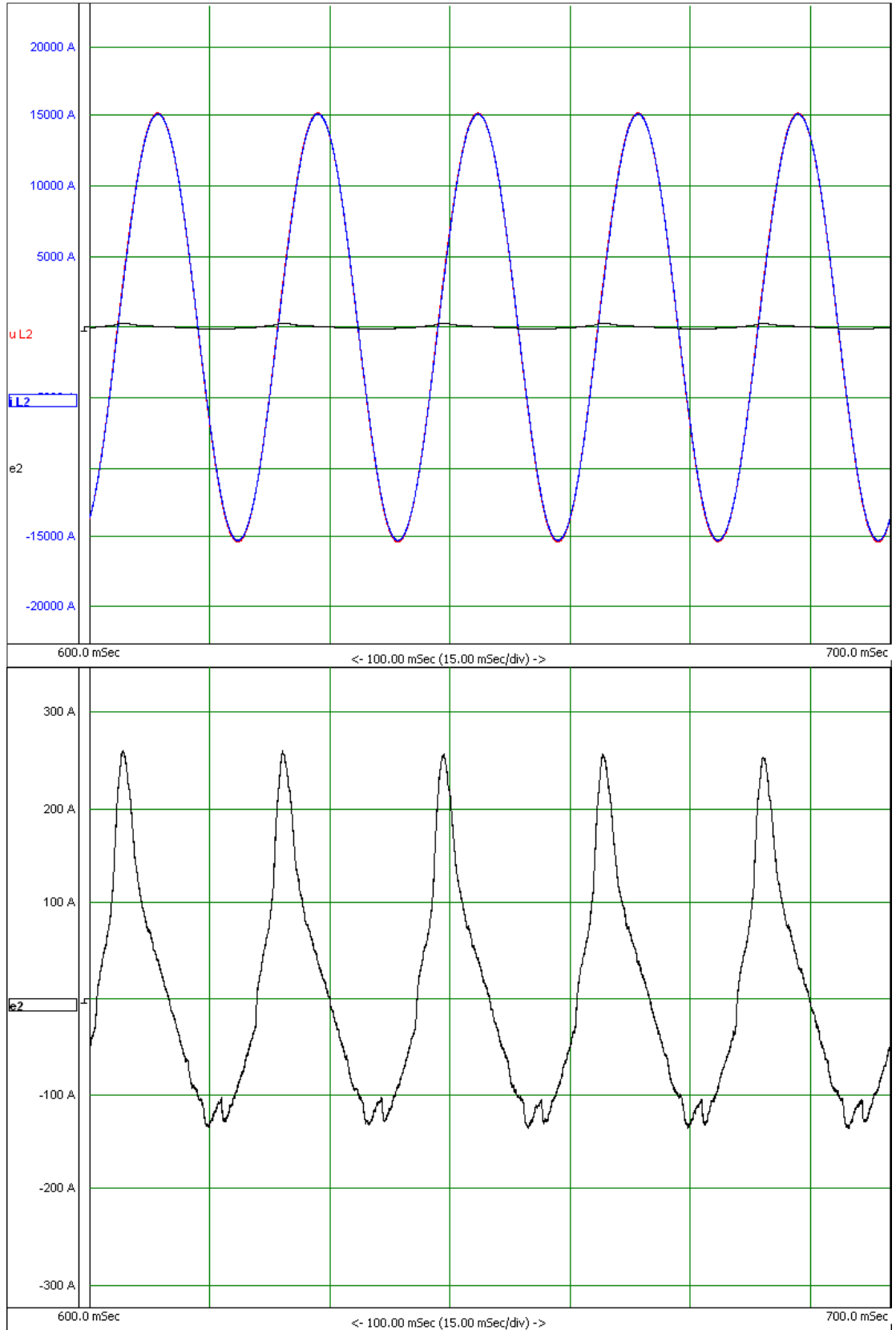
Şekil A.2.47 38.Test L2 Fazı Eğrileri



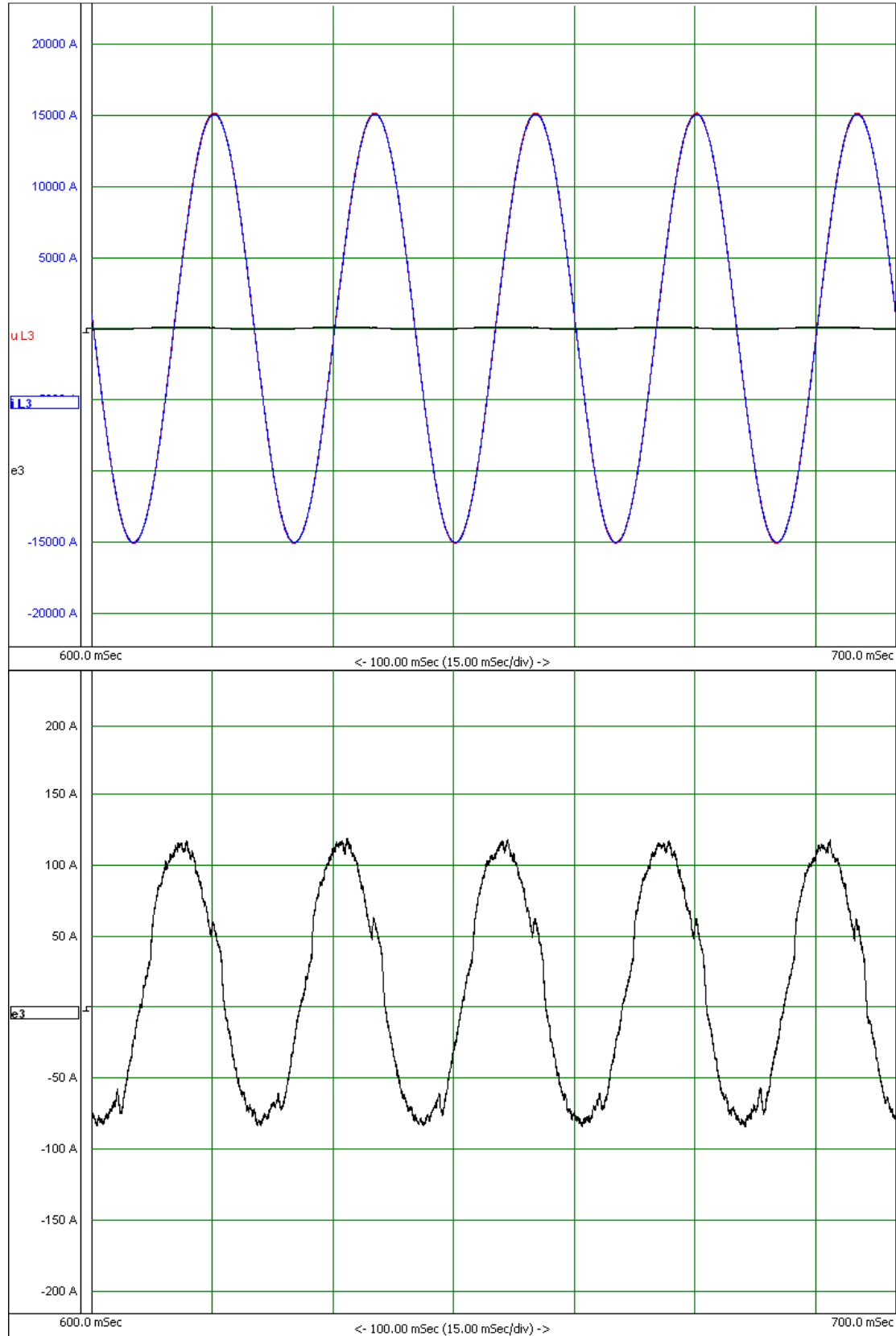
Şekil A.2.48 38.Test L3 Fazı Eğrileri



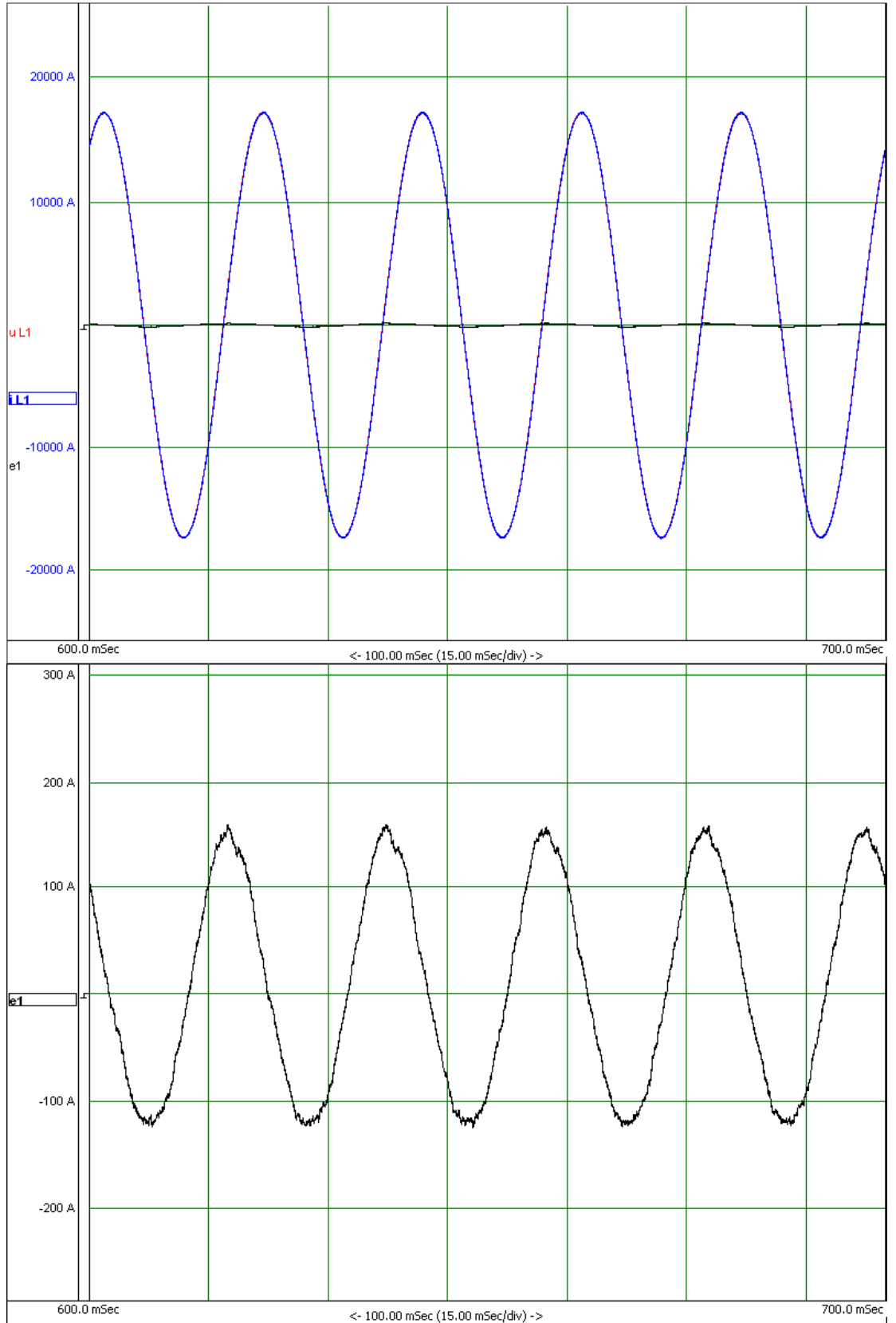
Şekil A.2.49 39.Test L1 Fazı Eğrileri



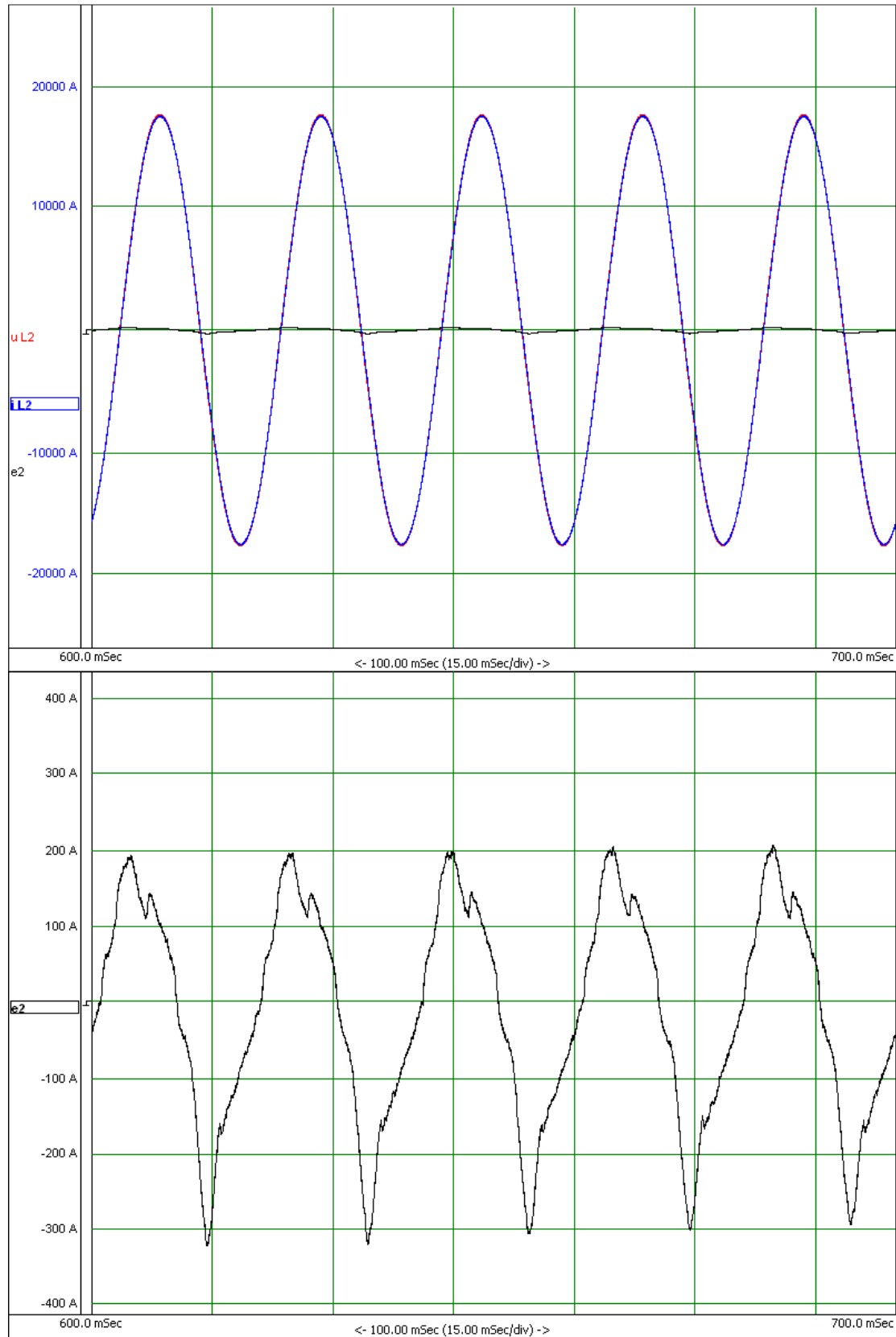
Şekil A.2.50 39.Test L2 Fazı Eğrileri



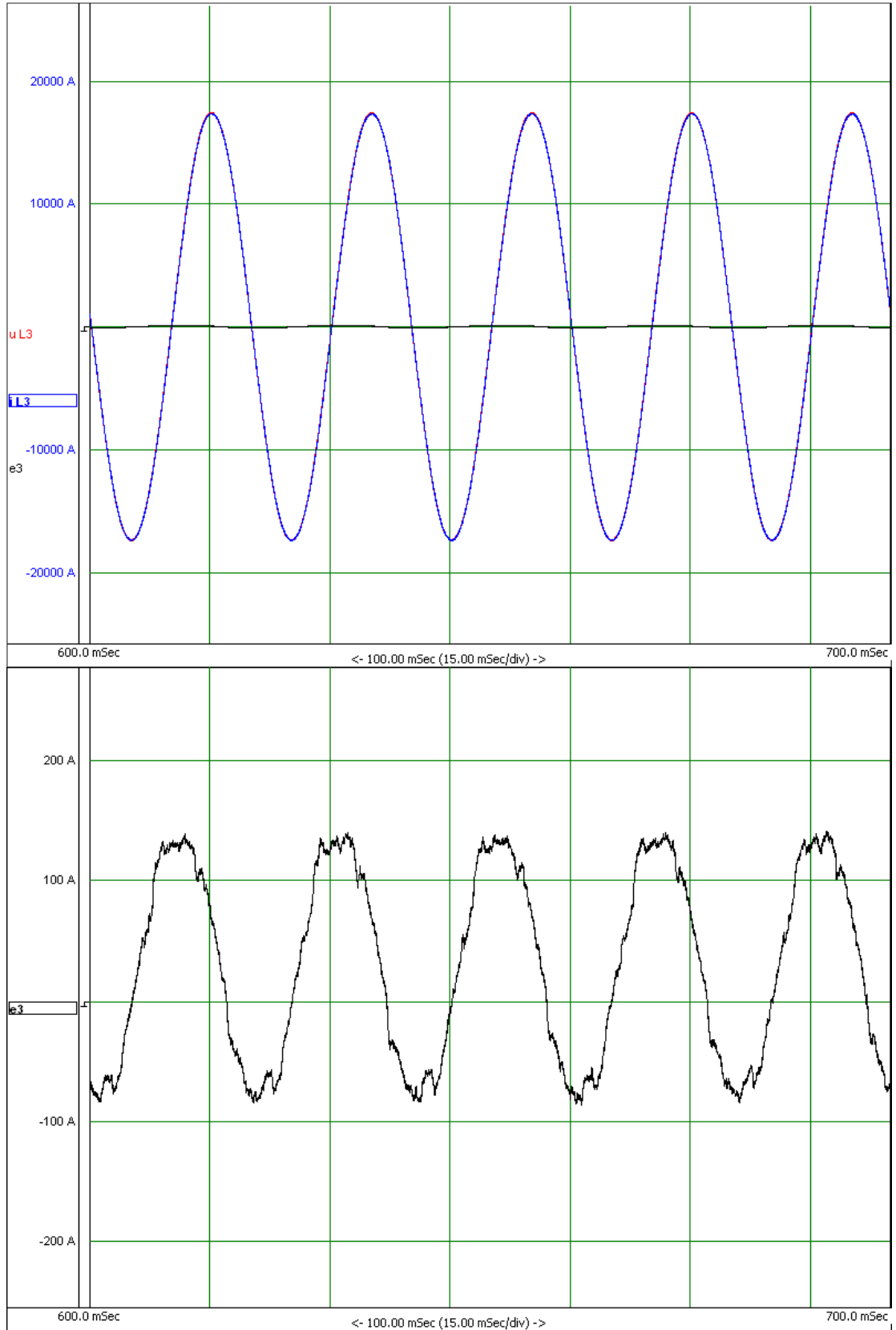
Şekil A.2.51 39.Test L3 Fazı Eğrileri



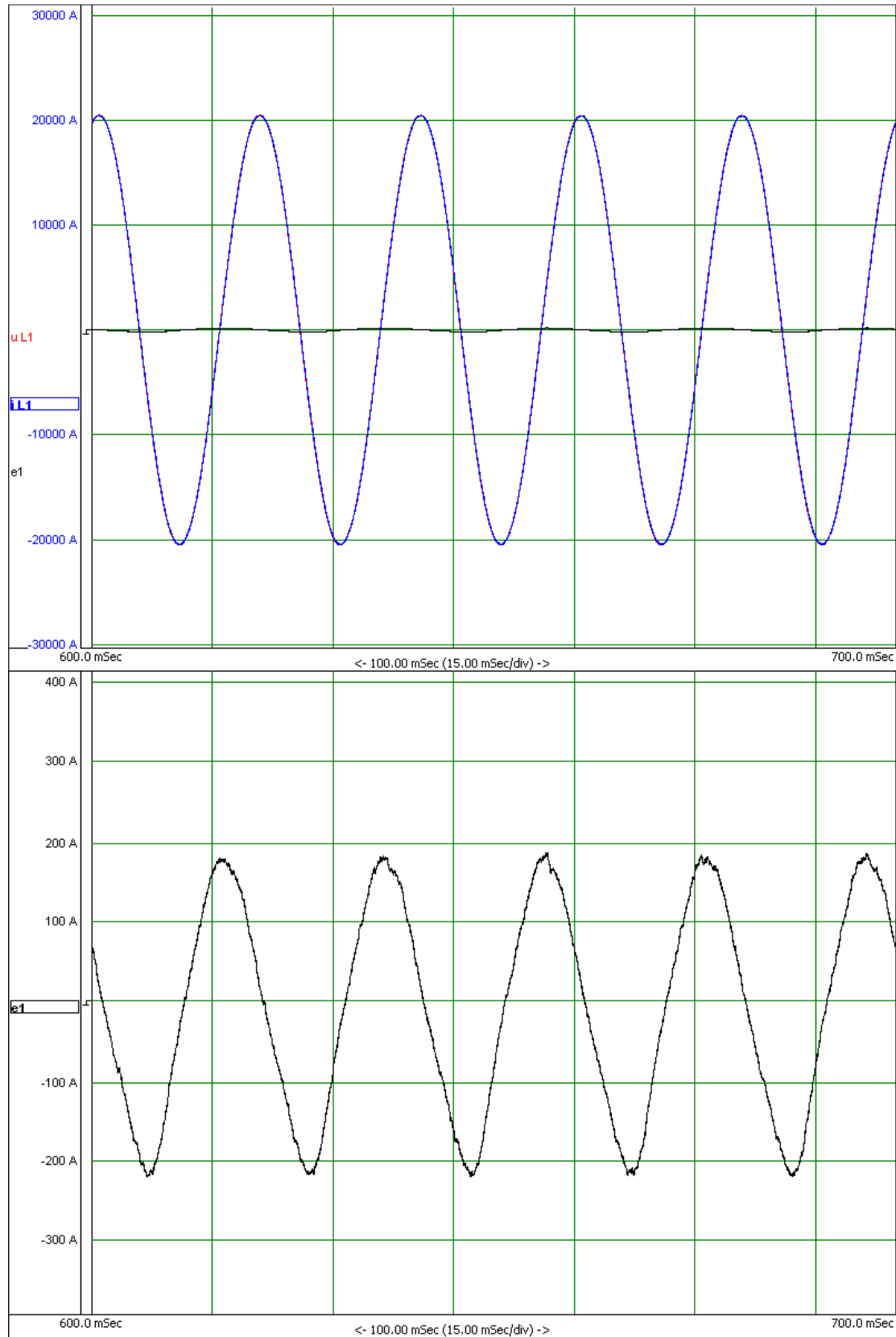
Şekil A.2.52 40.Test L1 Fazı Eğrileri



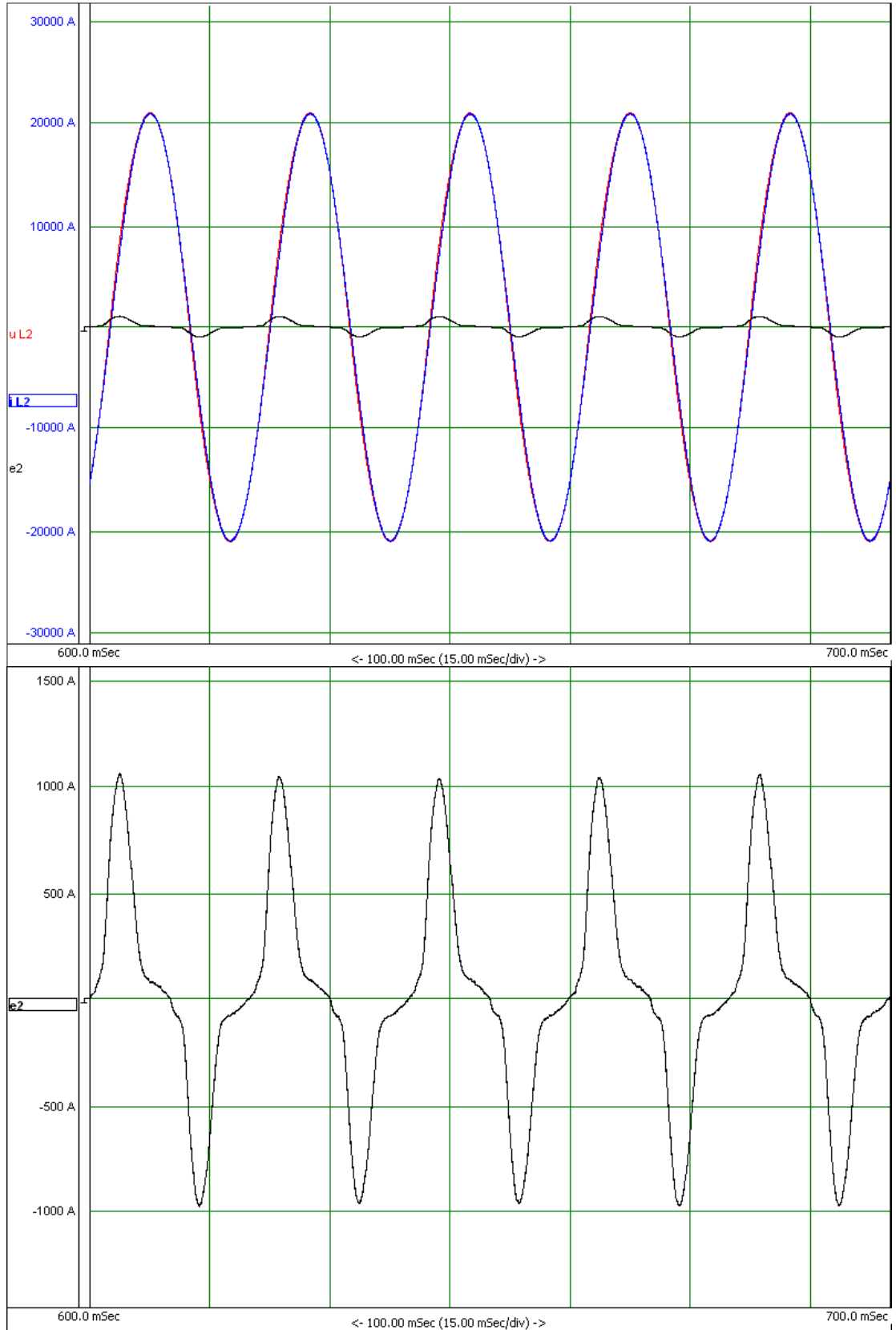
Şekil A.2.53 40.Test L2 Fazı Eğrileri



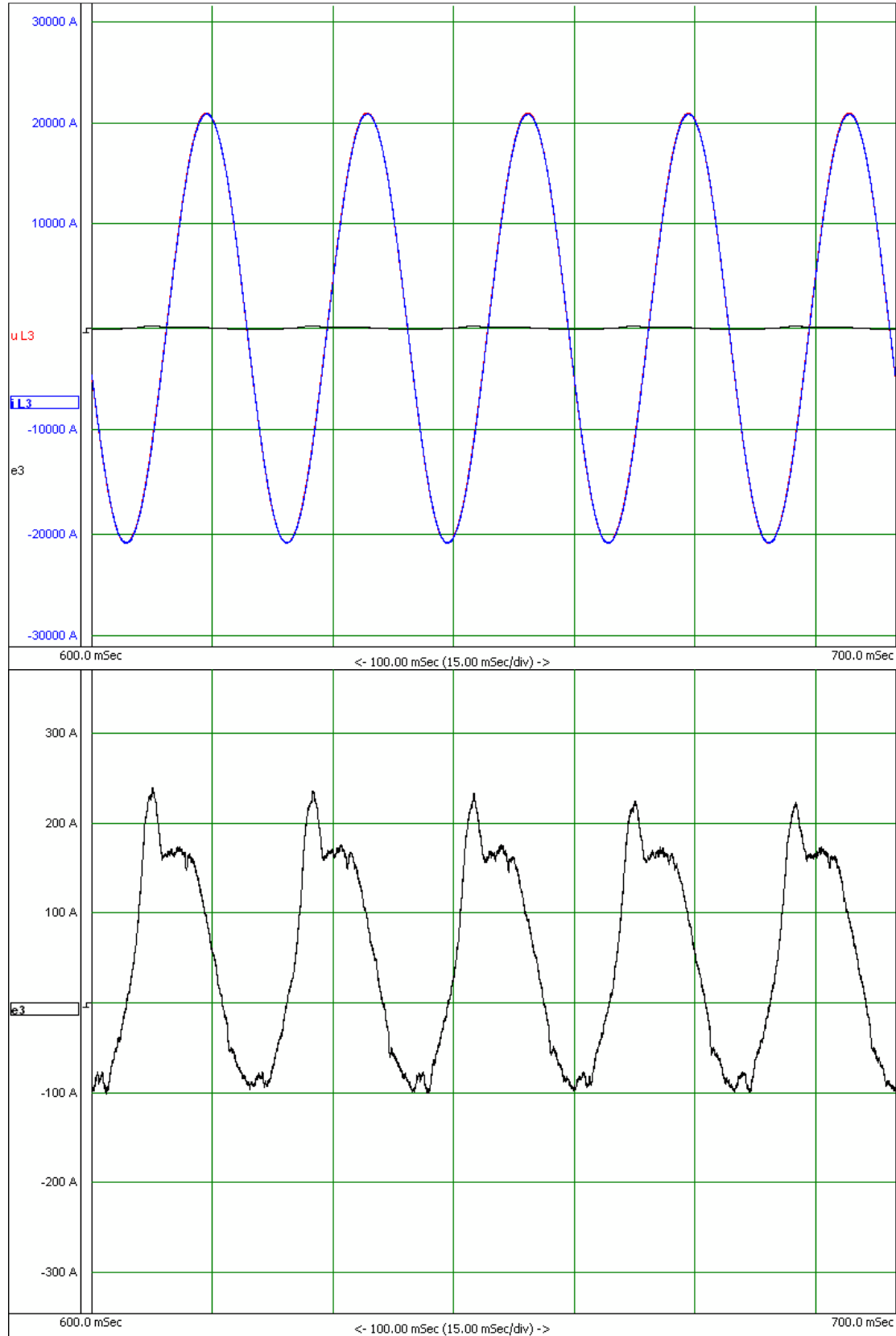
Şekil A.2.54 40.Test L3 Fazı Eğrileri



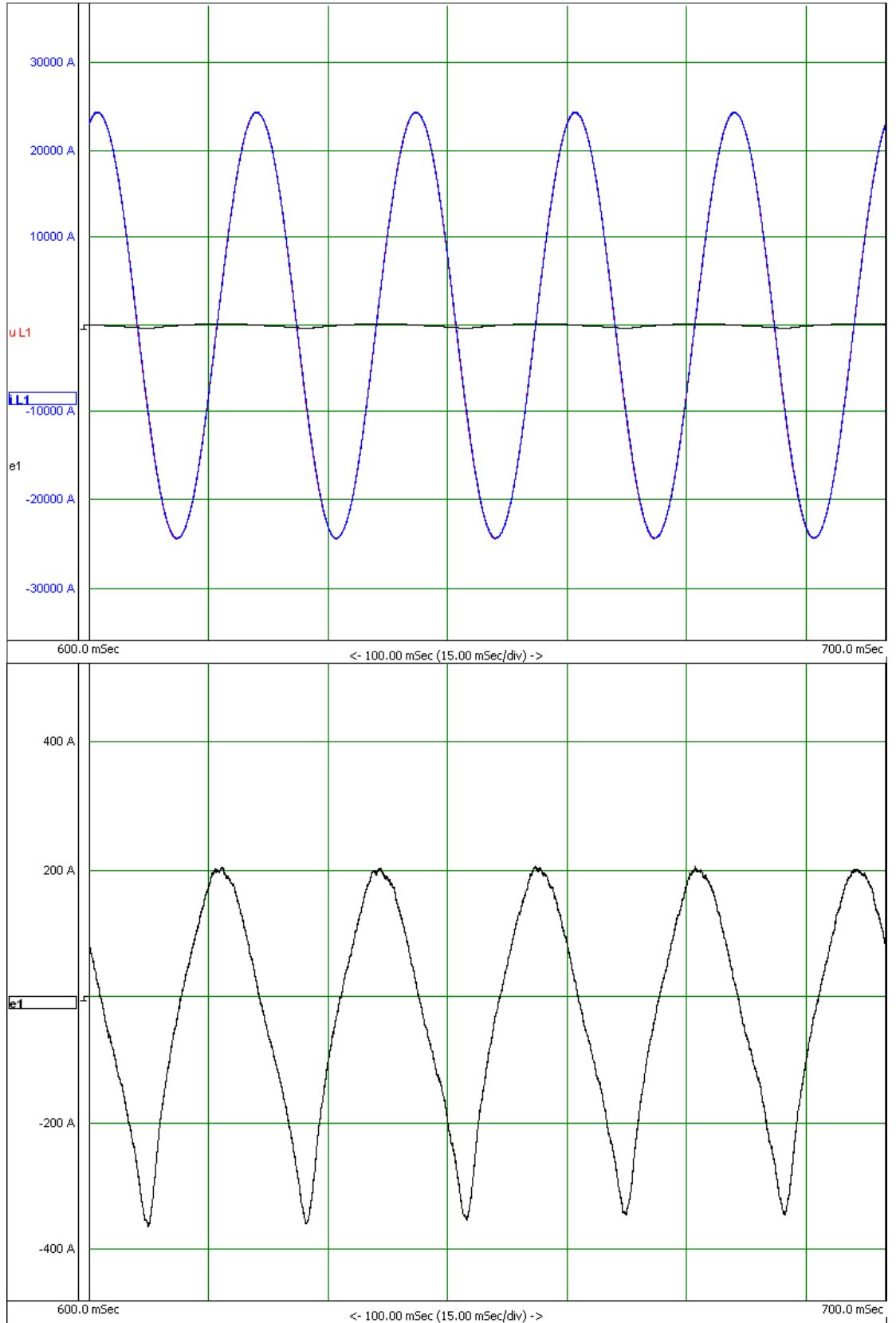
Şekil A.2.55 41.Test L1 Fazı Eğrileri



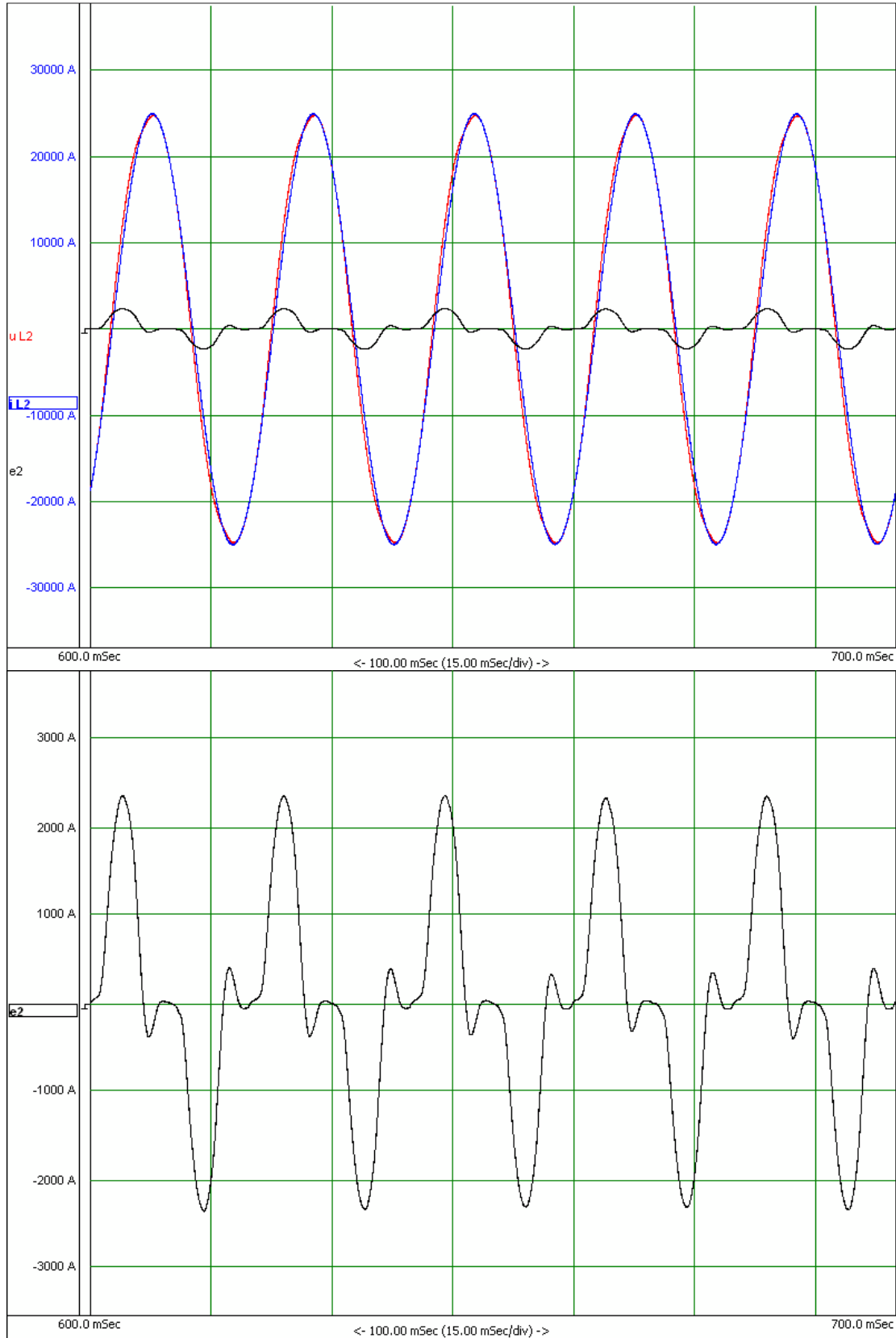
Şekil A.2.56 41.Test L2 Fazı Eğrileri



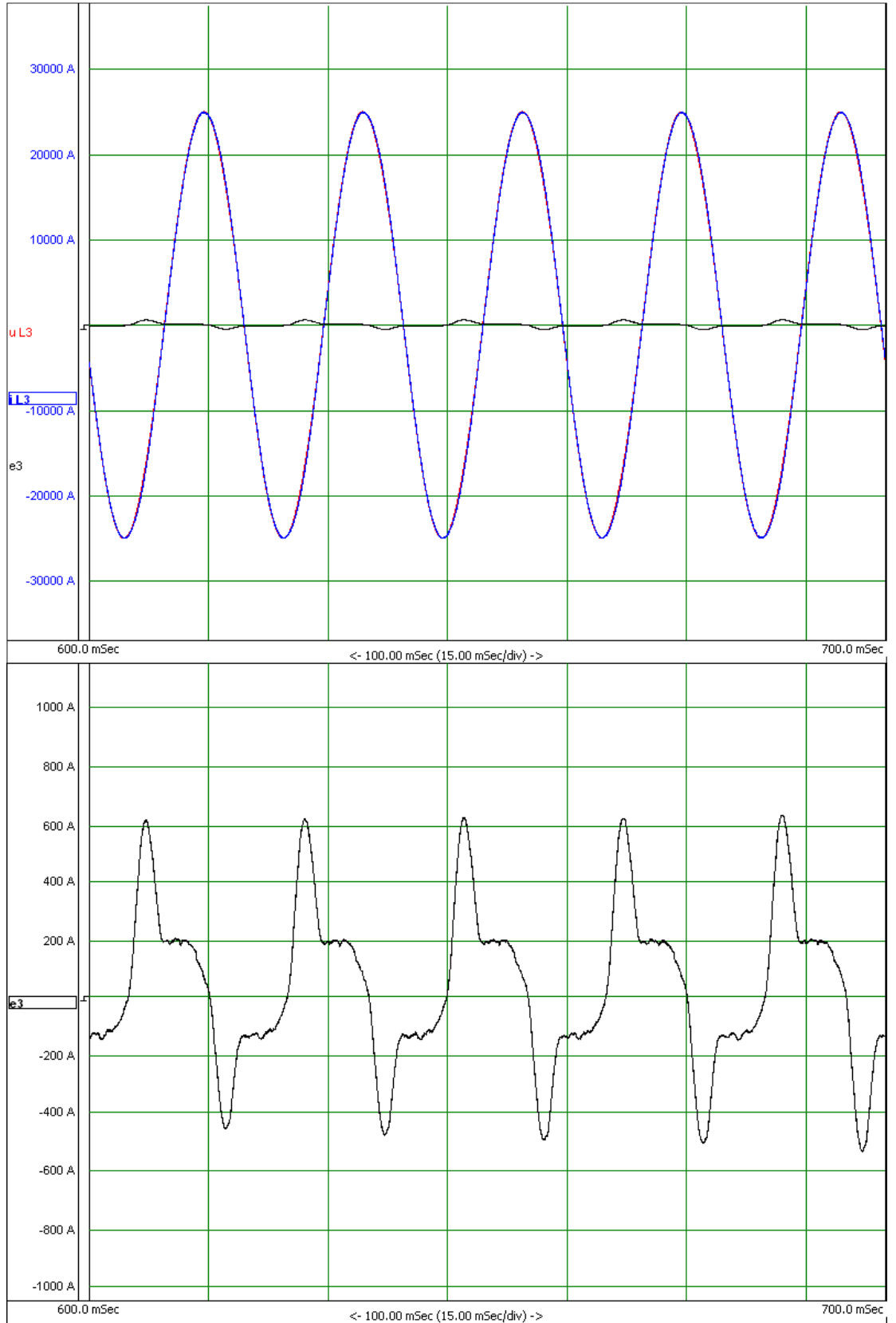
Şekil A.2.57 41.Test L3 Fazı Eğrileri



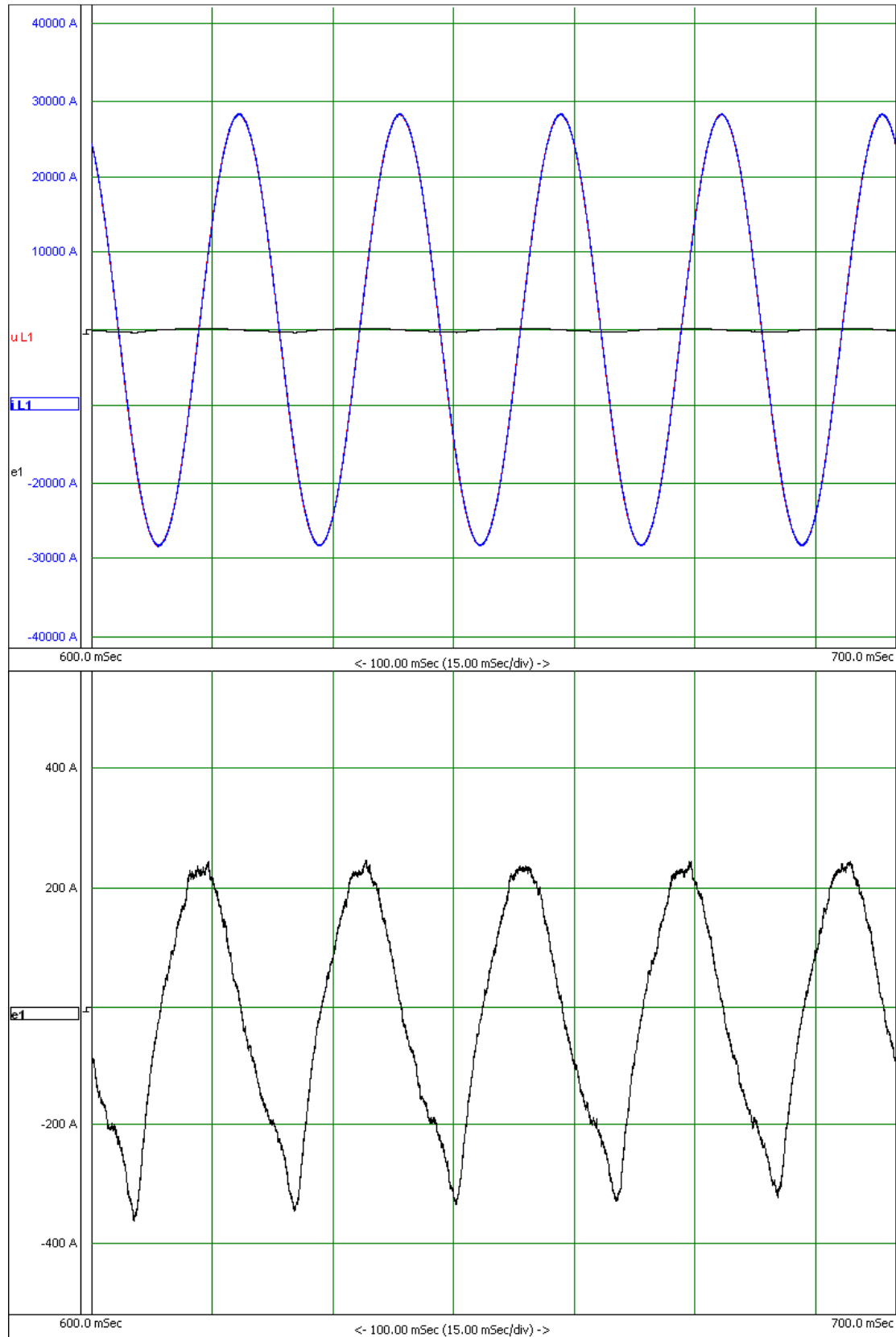
Şekil A.2.58 42.Test L1 Fazı Eğrileri



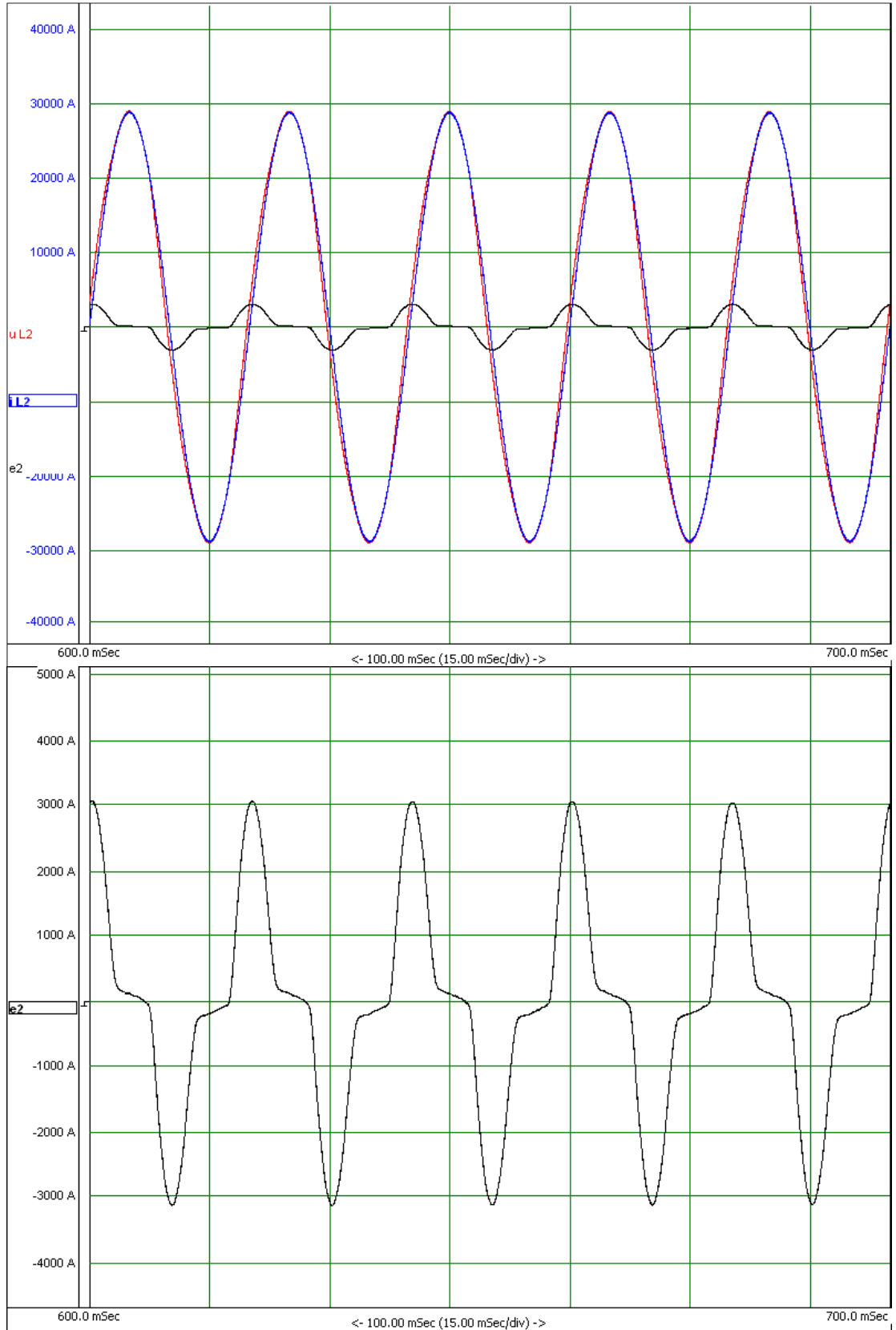
Şekil A.2.59 42.Test L2 Fazı Eğrileri



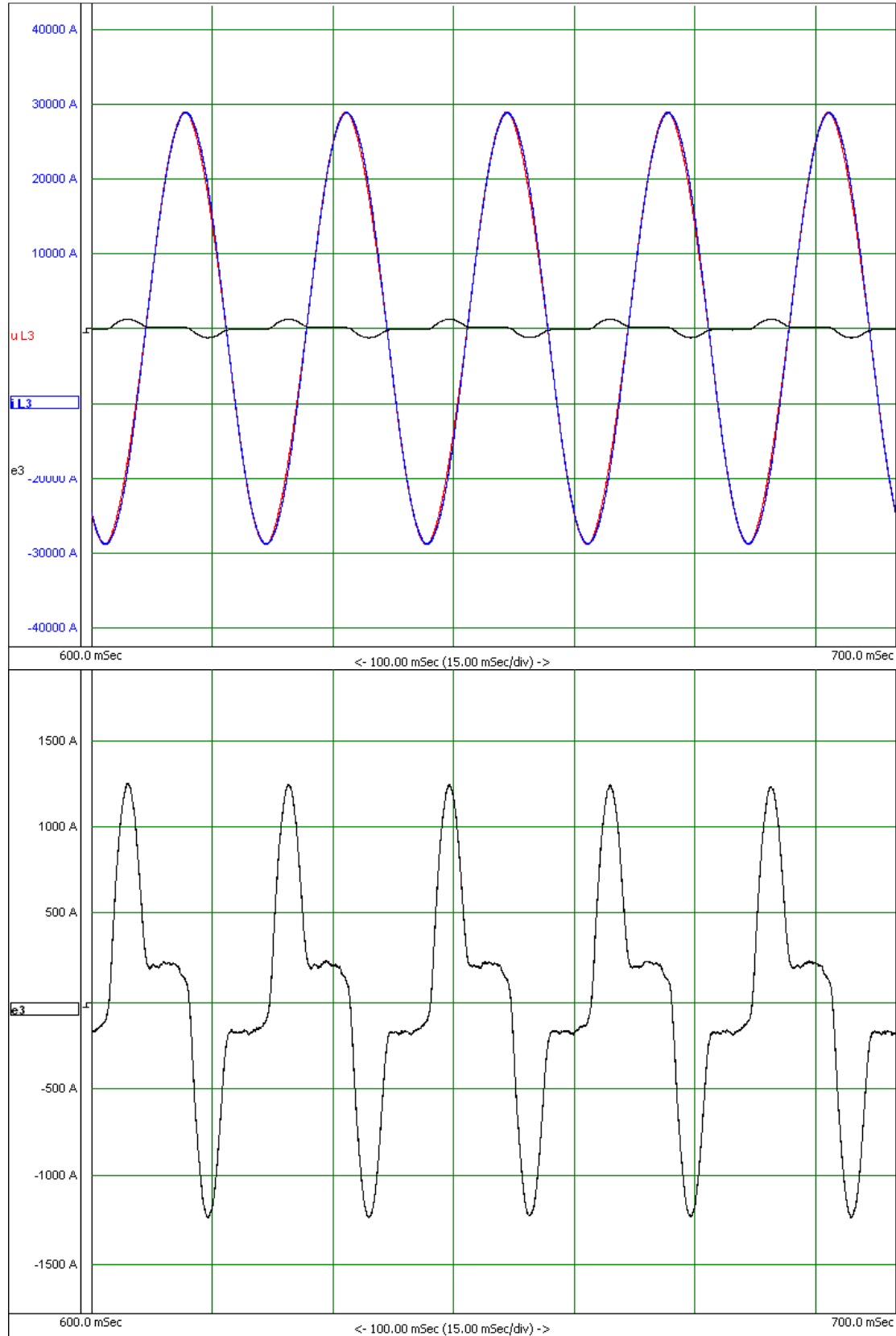
Şekil A.2.60 42.Test L3 Fazı Eğrileri



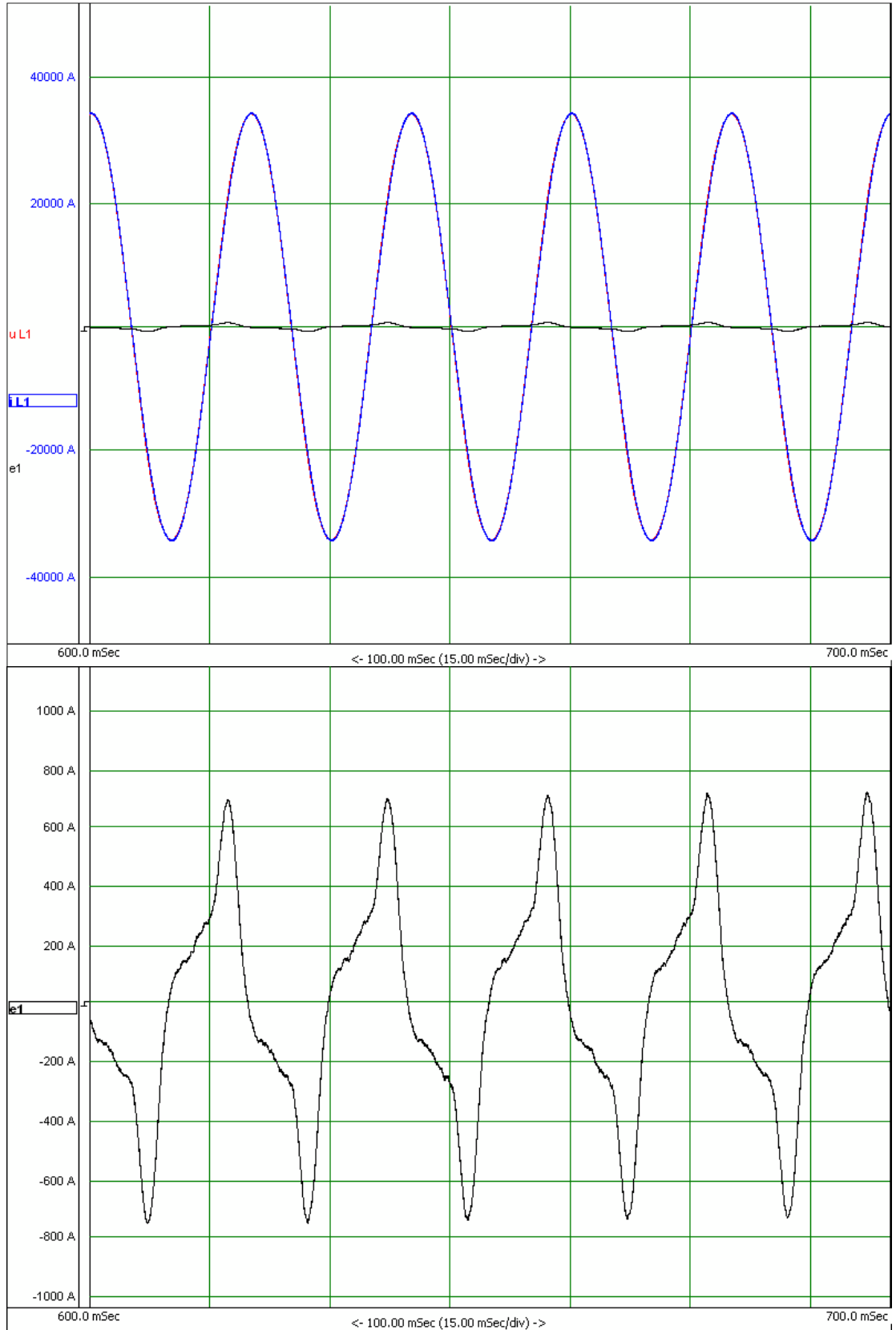
Şekil A.2.61 43.Test L1 Fazı Eğrileri



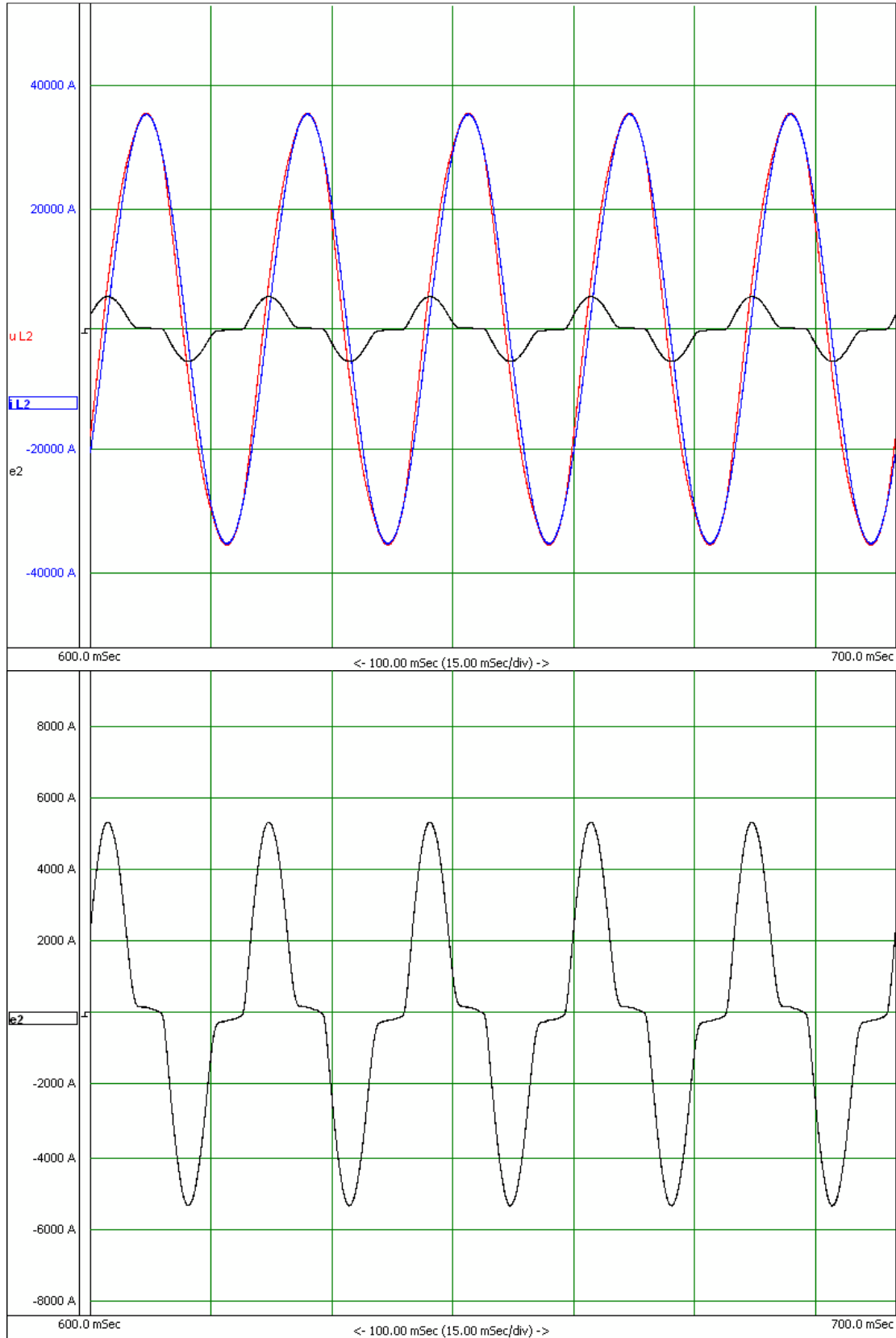
Şekil A.2.62 43.Test L2 Fazı Eğrileri



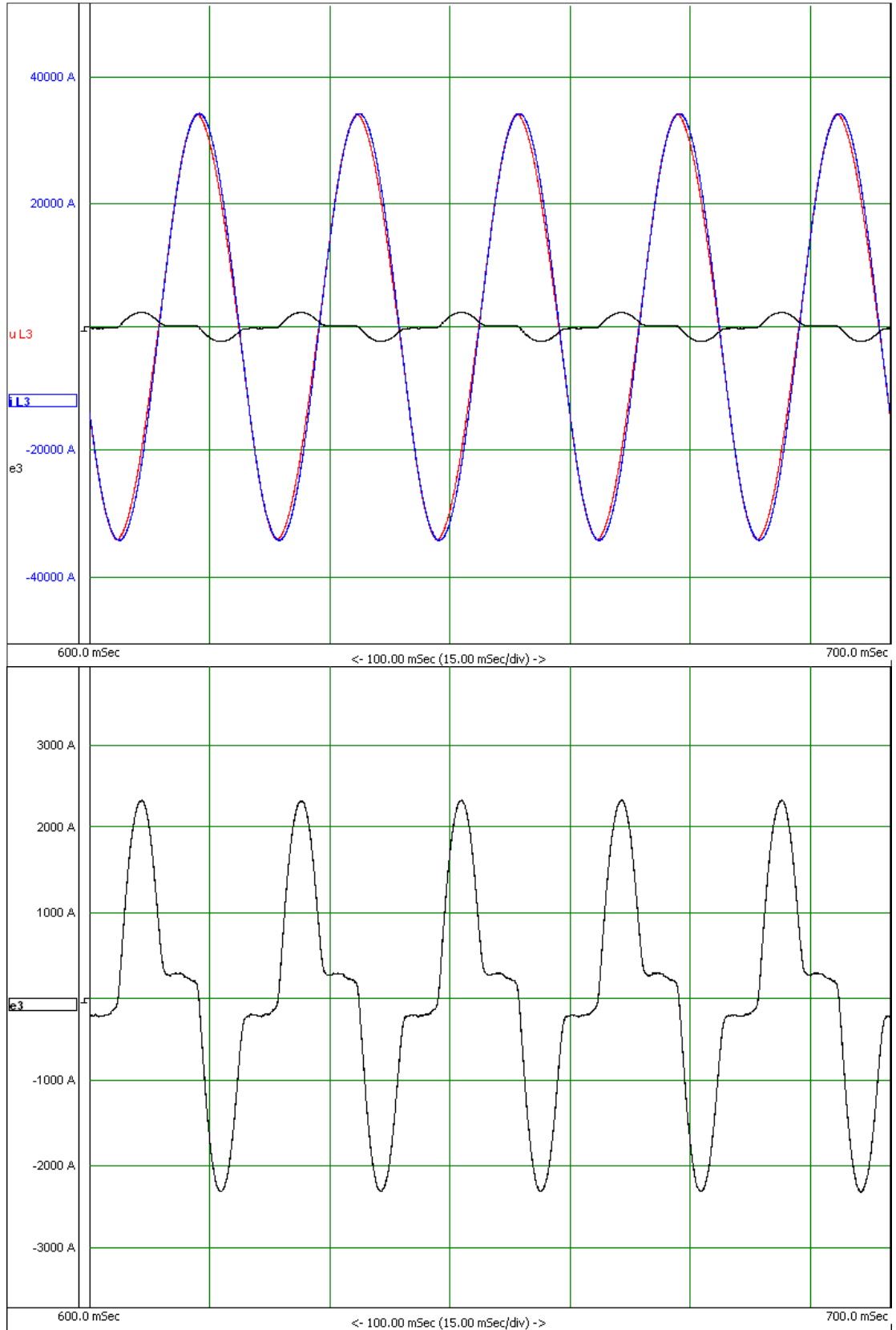
Şekil A.2.63 43.Test L3 Fazı Eğrileri



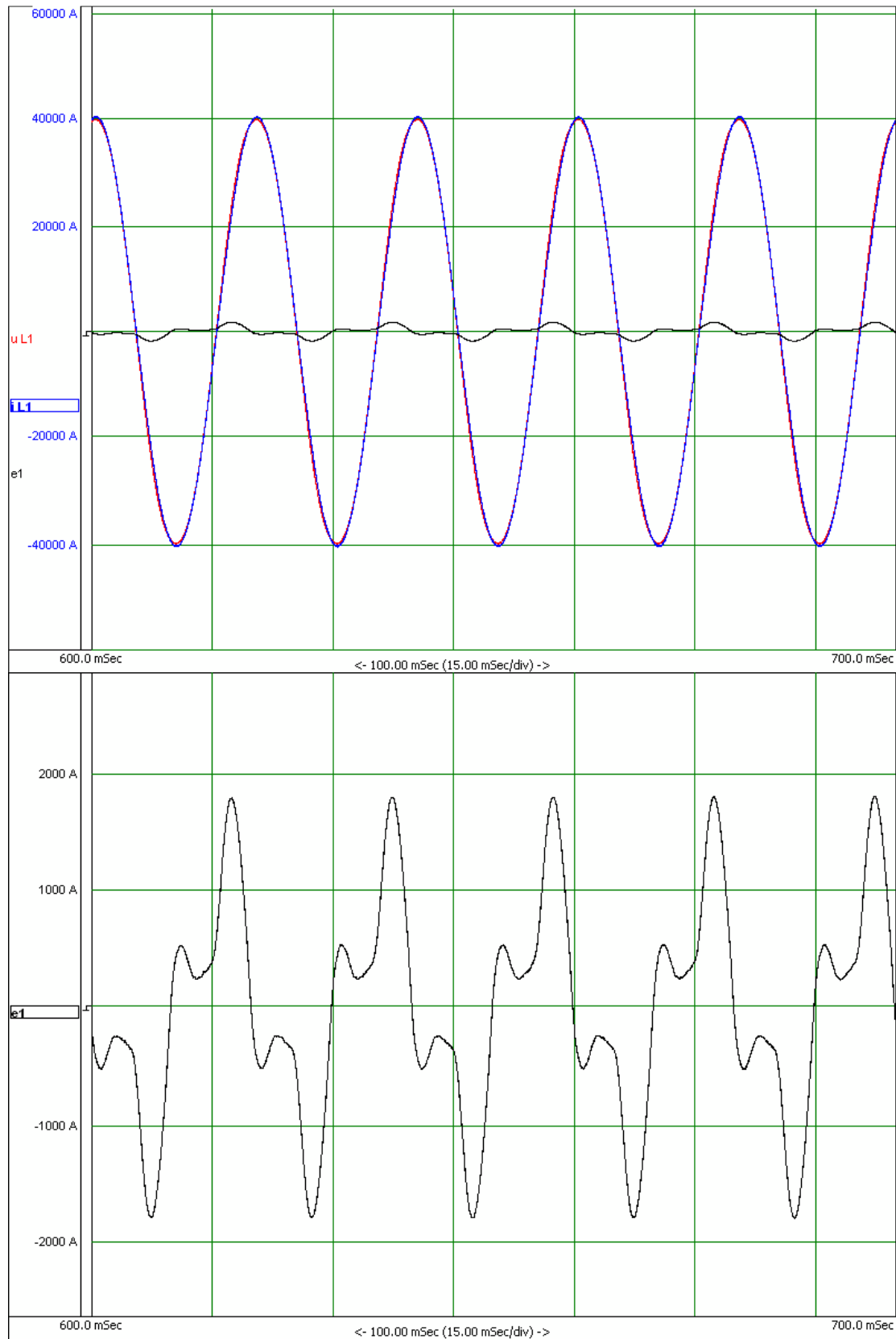
Şekil A.2.64 44.Test L1 Fazı Eğrileri



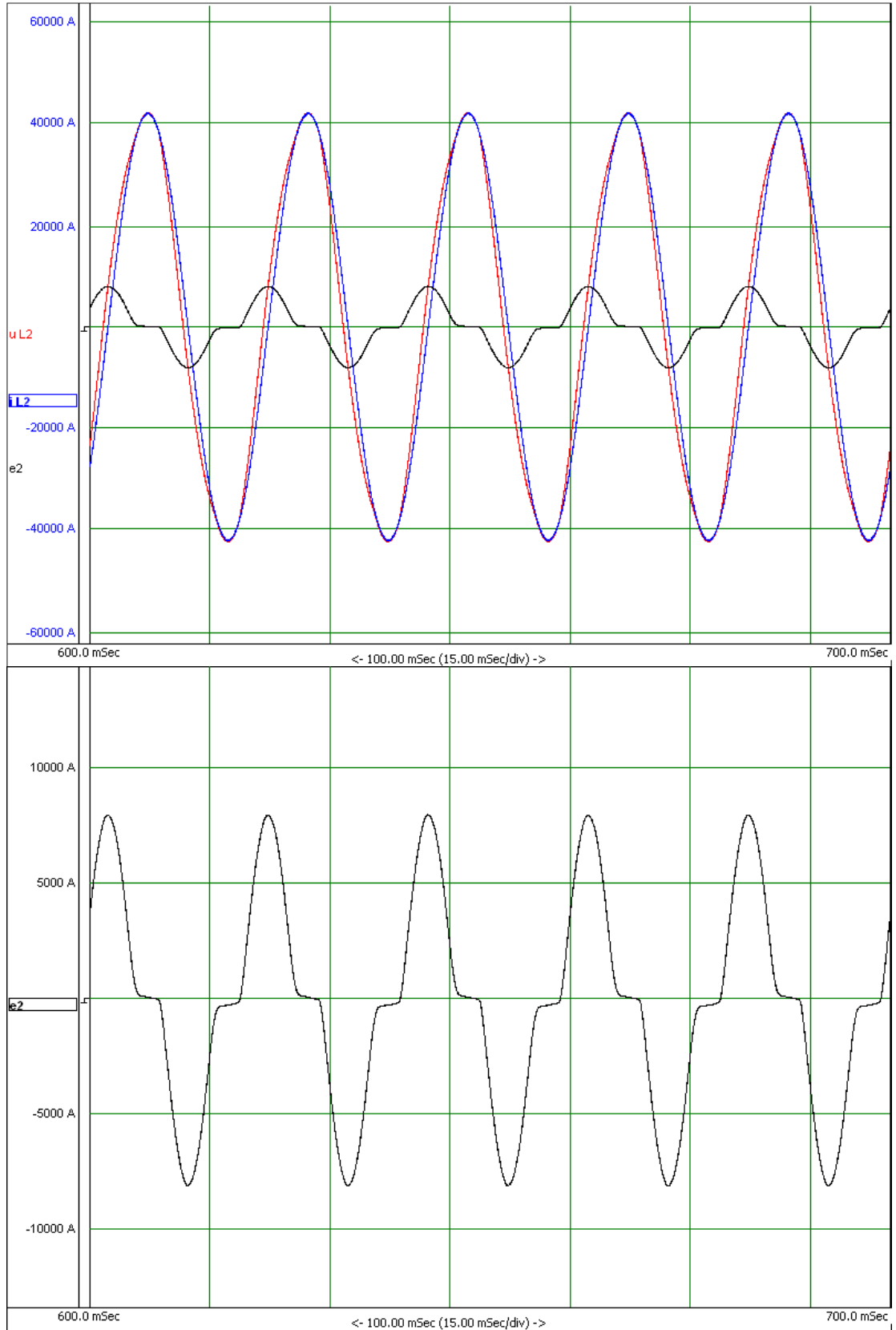
Şekil A.2.65 44.Test L2 Fazı Eğrileri



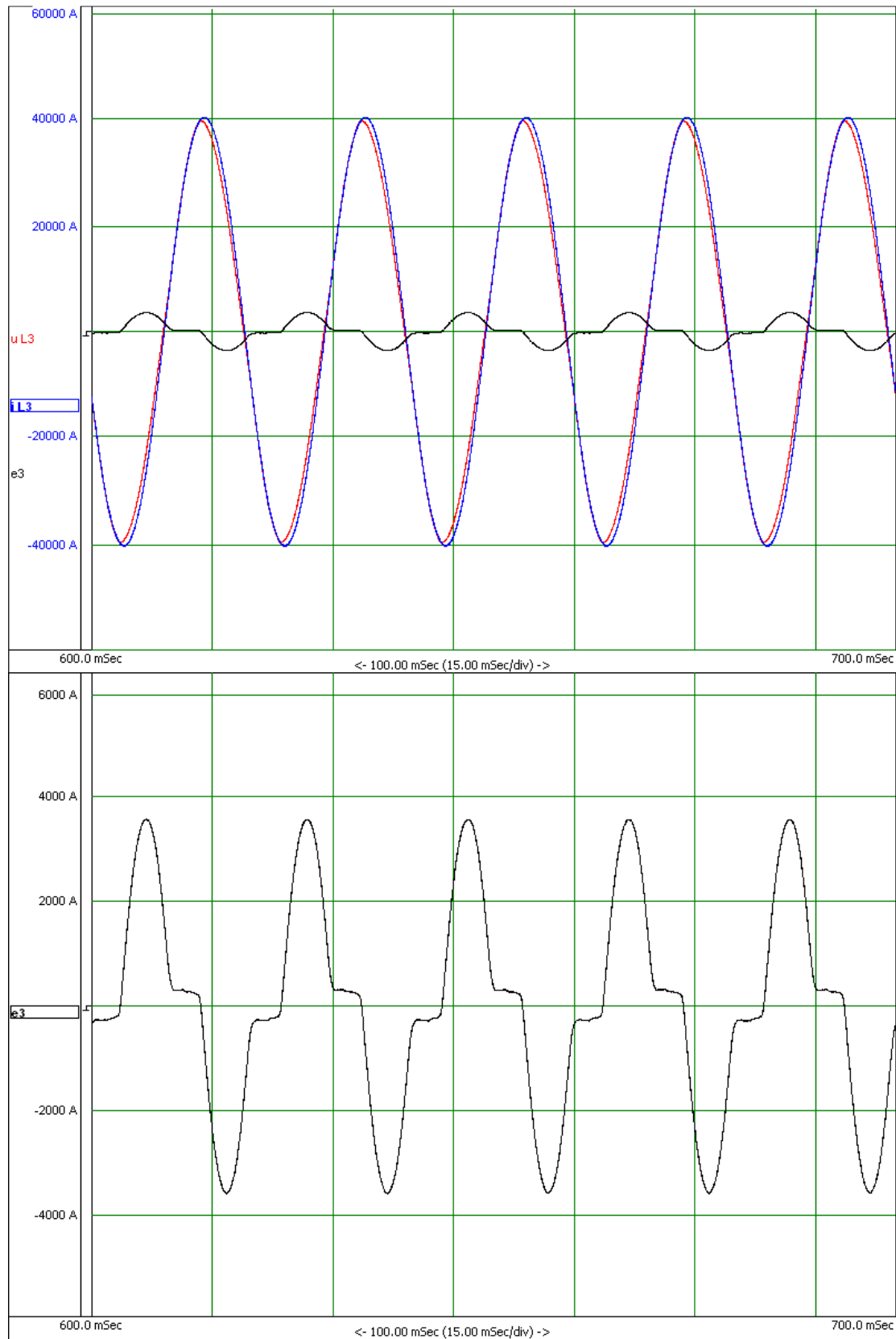
Şekil A.2.66 44.Test L3 Fazı Eğrileri



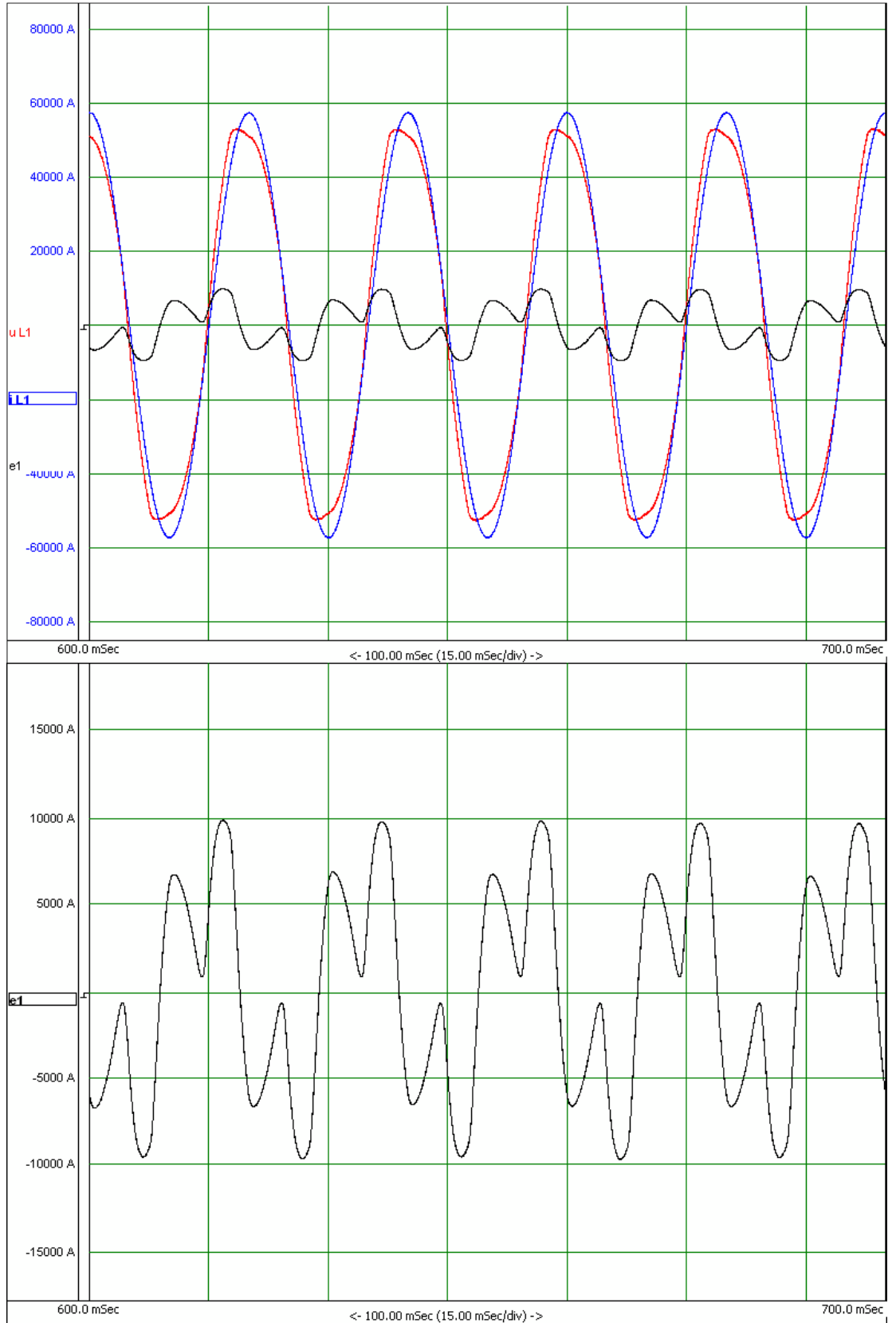
Şekil A.2.67 45.Test L1 Fazı Eğrileri



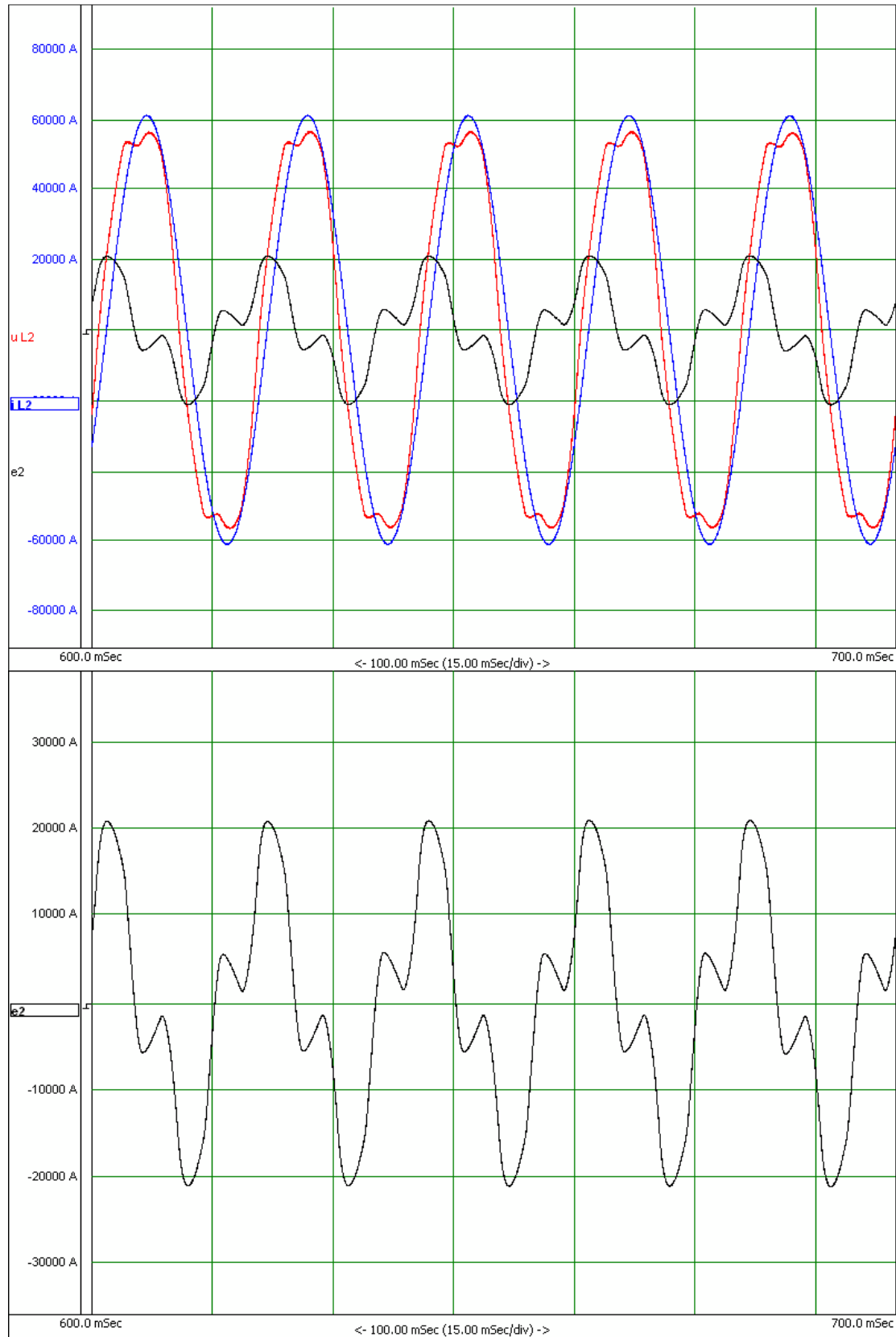
Şekil A.2.68 45.Test L2 Fazı Eğrileri



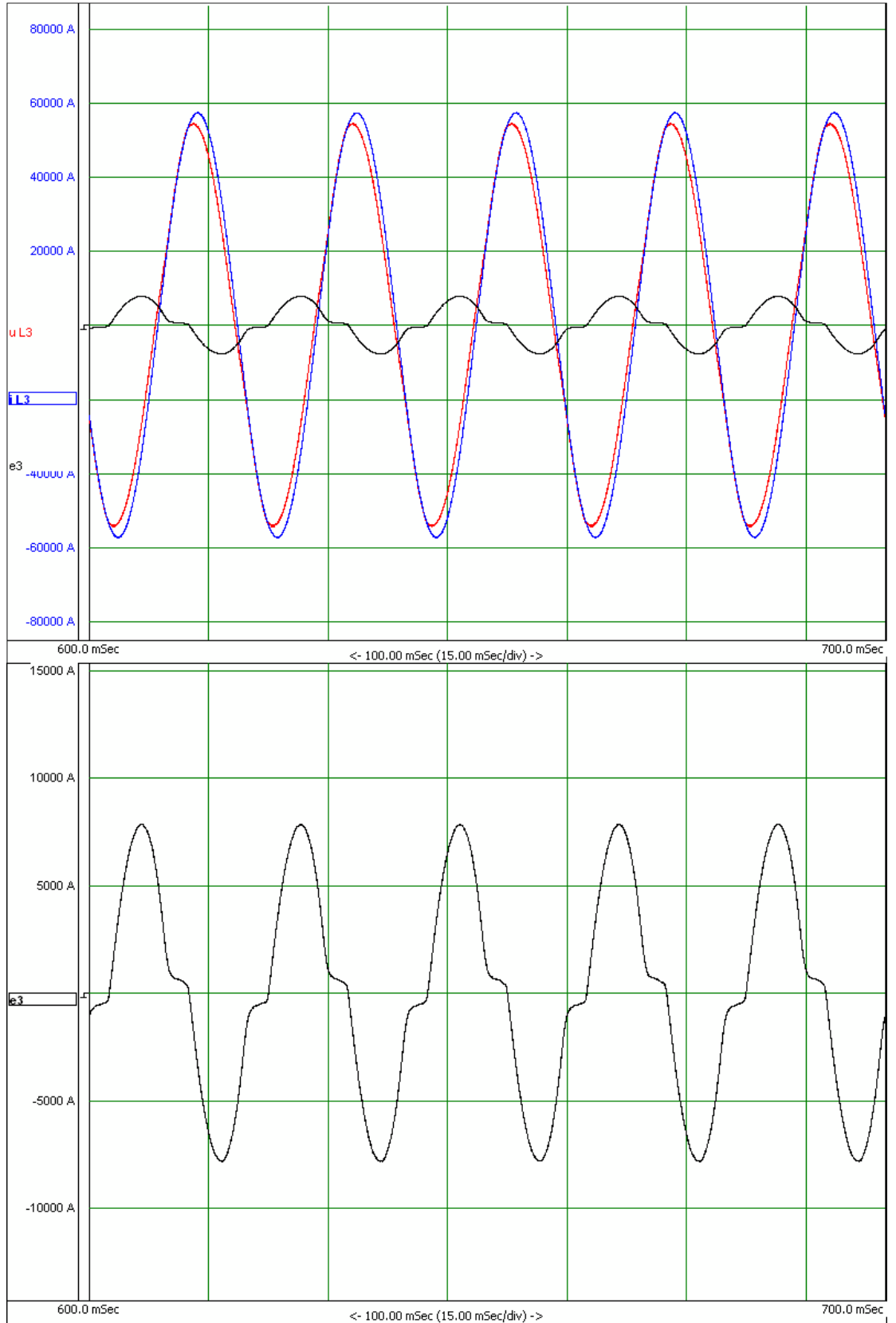
Şekil A.2.69 45.Test L3 Fazı Eğrileri



Şekil A.2.70 46.Test L1 Fazı Eğrileri



Şekil A.2.71 46.Test L2 Fazı Eğrileri



Şekil A.2.72 46.Test L3 Fazı Eğrileri

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ali YILDIRIM

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa – 14.03.1983

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, 2006

Yayın Listesi:

- Tuncay N. R., Üstün Ö., Yılmaz M., Yıldırım A., Tüysüz A., Şahin A., Titiz F. K., Gökçe C., Karakaya U.: Güneş Enerjili Yarış Aracının Elektrik Tasarım Ölçütlerinin, Yol Performans Simülasyonunun ve Enerji Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi. *ELECO Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Aralık 2006 Bursa, Türkiye.