

# Elektrikli Arabalarda Kullanılan Li-ion Akülerin Tek Fazdan Hızlı ve Verimli Şarjı için Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselticilerin Karşılaştırması

## Comparison of Single Phase Power Factor Correction Boost Converters for Fast and Efficient Charge of Li-ion Batteries Used in Electrical Cars

Burak Akın

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
bakin@yildiz.edu.tr

### Özet

Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenerek olmaları ve atmosfere CO<sub>2</sub> salması nedeniyle yeni enerji kaynaklarının arayışı içerisinde girilmiştir. Temiz bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin motorlu taşıtlarda kullanılması, Li-ion aküler ile mümkündür. Li-ion akülerin şarjında kullanılacak AC-DC dönüştürücüler literatürde sıkça yer almaktadır [1-13]. Bunu gerçekleştirmek için güç faktörü düzeltmeli (PFC), geleneksel, köprüsüz ve dönüşümlü gerilim yükseltici devrelerinin simülasyonları yapılmıştır. 100 kHz anahtarlama frekansında ve 3 kW çıkış gücünde çalıştırılarak simülasyonları yapılan dönüştürücüler, güç faktörü (PF), toplam akım harmonik bozulma (THDi) ve verim açısından karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre geleneksel yükseltici % 97.8 verim ve % 4.88 THDi değerlerine, köprüsüz yükseltici % 98.2 verim ve % 5.05 THDi değerlerine, dönüşümlü yükseltici ise % 98 verim ve %1.93 THDi değerlerine sahiptir. Tüm dönüştürücüler 0.99 güç faktörü değerini sağlasa da, köprüsüz yükseltici THDi değeri, EN61000-3-2 standardı olan, % 5'in üzerinde bulunduğundan, li-ion akülerin şarjı için, dönüşümlü yükseltici daha iyi performans göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Dönüşümlü PFC, köprüsüz PFC, Li-ion.

### Abstract

New energy sources have been searched because of depletion of fossil fuels in near future and to reduce the CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. It is possible to use clean energy source of electricity in electrical vehicles by li-ion batteries. There are many AC-DC converters in the literature to charge Li-ion batteries [1-13]. For this reason, conventional PFC, bridgeless PFC and interleaved PFC boost converters are simulated. Simulations are run at 3 kW output power with 100 kHz switching frequency and they are compared with power factor (PF), total current harmonic distortion (THDi) and efficiency. According to the simulation results conventional boost converter has 97.8 % efficiency and 4.88 % THDi values, bridgeless boost converter has 98.2 % efficiency and 5.05 % THDi values, interleaved boost converter has 98 % efficiency and 1.93% THDi values. Although all converters have greater than 0.99 power factor, bridgeless boost converter THDi

value is above the EN 61000-3-2 standards which is 5%, so for li-ion battery charging, interleaved boost topology has better performance.

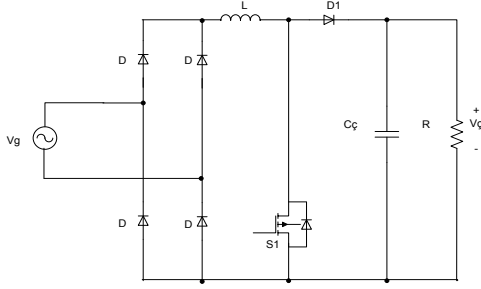
Keywords: Interleaved PFC, Bridgeless PFC, Li-ion.

### 1. Giriş

Günümüzde pahalı fosil kaynaklı yakıtları kullanan araçların atmosfere karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salması ve yakın bir gelecekte bu yakıtların tükenerek olması bilinen bir gerçektir. Bu sebeple alternatif enerji kaynaklarının motorlu araçlarda kullanılması için bir fırsat doğmuş ve elektrikli araçların yeniden üretilmesi planlanmıştır. Elektrikli araçların seri olarak üretilmesine henüz yeni başlanılmasına karşın, yakın bir gelecekte fosil yakıtların tükenerek olması ve CO<sub>2</sub> salınım etkisini azaltmak için oldukça rağbet göreceği düşünülmektedir.

Şu anki teknoloji ile elektrikli araçların enerji kaynağı olan lityum-iyon (li-ion) akülerle yapılacak mesafe 150 km civarında olsa da, şehir içi kullanımı için çok ideal olup şehir merkezlerindeki CO<sub>2</sub> salınımını da ciddi oranda azaltacağı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanacak düşük vergi oranı ile toplumun bu yönde teşvik edileceği görüşü yaygındır.

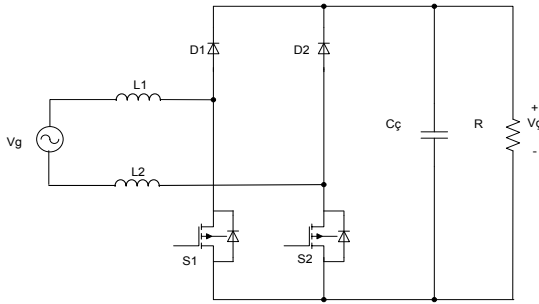
Li-ion akülerin şarjında kullanılacak alternatif akımdan doğru akıma (AC-DC) dönüştürme yapan geleneksel yükseltici topolojisi, Şekil 1'de gösterilmiştir. Geleneksel yükselticilerin verim, güç faktörü ve THDi değerlerini geliştirmek üzere köprüsüz ve dönüşümlü yükseltici topolojileri geliştirilmiştir. Literatürde yeni geliştirilmiş yükseltici topolojileri bulunmakla birlikte [13], bu makede 3 temel PFC yükseltici incelenmiş ve performansları analiz edilerek sonuçlar ortaya konulmuştur. Diyot köprüsü arkasına yerleştirilen gerilim yükseltici devre, sabit çıkış gerilimini sağlarken aynı zamanda şebekeden de sinüzoidal bir akım çekmektedir. Çıkış gerilimi, giriş akımı ve giriş geriliminden üretilen referans akıma göre darbe genişlik modülasyonuna (PWM) göre kontrol edilen devre tek aşamalıdır.



Şekil 1: Geleneksel yükseltici.

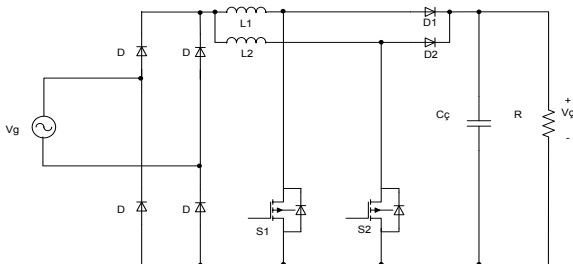
Şekil 2’de gösterilen köprüsüz yükselticilerin girişinde köprü diyotları olmadığından, geleneksel yükselticilere göre verimi daha yüksektir ve daha az elamana ihtiyaç duyarlar. Ancak bu dönüştürücülerin toplam akım harmonik bozulma (THDi) değerleri ve elektromanyetik girişim (EMI) seviyeleri geleneksel yükselticilere göre daha yüksektir. Literatürdeki kaynakların neredeyse tamamı 1 kW’dan küçük deneysel amaçlı tasarlanmış devrelerdir [1, 10].

Köprüsüz yükselticinin kontrolü, her sıfır geçişinde ilgili anahtar giriş akım ve gerilimi ile çıkış gerilimine bağlı olarak kontrol edilir. Hem birim PFC değerine hem de düşük THDi’ye ulaşmak için kontrolün hızlı ve doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Çıkış gücü arttıkça geleneksel yükselticiye göre verimi de artmaktadır.



Şekil 2: Köprüsüz yükseltici.

Şekil 3’de gösterilen dönüştürümlü yükselticiler, yüksek güçte geleneksel yükselticilerin güç dağılımı ve akım dalgalılığını azaltmak için geliştirilmiştir. Girişinde diyot köprüsü bulunmakla birlikte, doğrultucu çıkışında 180° dönüştürümlü çalışan iki adet yükseltici devresi bulunmaktadır. Eleman sayısında artış ve karmaşık kontrolüne rağmen, dönüştürümlü yükselticiler düşük EMI ve akım dalgalılık oranlarına sahiptir. Verim değerleri de geleneksel yükselticilere göre daha yüksektir.



Şekil 3: Dönüştürümlü yükseltici.

Bu çalışmadaki amaç, geleneksel, köprüsüz ve dönüştürümlü PFC yükseltici devrelerinin aynı şartlar altında performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırma yapılırken, dönüştürücülerin tek fazdan beslenmesi, 100 kHz anahtarlama frekansında 3 kW çıkış gücünü ve 400V regüleli çıkış gerilimini sağlaması, % 5’in altında THDi değerlerine sahip olması, verimin % 97’nin üzerinde olması ve güç faktörünün 0.99’dan büyük olması şartları aranmaktadır.

Tüm dönüştürücülerin tek aşamada regüleli çıkış gerilimini ve giriş sinüzoidal akımını sağlaması için, referans akımın 100 kHz toplam anahtarlama frekansında PWM kontrolü ile çalışması amaçlanmıştır.

## 2. Temel Büyüklüklerin Hesaplanması

Yükseltici devrelerdeki en kritik büyüklük sürekli (CCM) veya kesintili akım modunda (DCM) çalışan yükseltici endüktansın hesabıdır. Elektrikli arabalar için üretilen li-ion aküler 400V giriş gerilimli ve yaklaşık 24 kWh kapasitesinde olduğundan, hızlı ve güvenilir bir şarj için yüksek güç gerekmektedir. Bu makalede li-ion akü şarjına uygun dönüştürücüler 3 kW gücünde çalışacağından, sürekli akım modu tercih edilmiştir.

Yükseltici endüktans ve çıkış kondansatör değerlerini hesaplamak için aşağıdaki formüllerden yararlanılır. Sırasıyla  $I_g$  ve  $V_g$  şebeke giriş akım ve gerilimini,  $P_g$  ve  $P_c$  giriş ve çıkış gücünü,  $\eta_{\min}$  ve PF tahmin edilen minimum verim ve güç faktörünü,  $\lambda$  bağıl iletimde kalma oranını,  $\Delta I_L$  akım dalgalanma oranını  $f_{sw}$  anahtarlama frekansını, L yükseltici endüktans değerini,  $V_c$  çıkış gerilimini,  $\Delta t$  çıkış kondansatörünün yükü besleme süresini ve  $C_c$  çıkış kondansatör değerini ifade eder.

Maksimum giriş gücü,

$$P_{g(\text{mak})} = \frac{P_{c(\text{mak})}}{\eta_{\min}} \quad (1)$$

Maksimum giriş akımı,

$$I_{g(\text{mak})} = \frac{P_{c(\text{mak})}}{\eta_{\min} (V_{g(\text{eff})}(\min)) PF} \quad (2)$$

Giriş akımının maksimum tepe değeri,

$$I_{g(\text{tepe})\text{max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{c(\text{mak})}}{\eta_{\min} (V_{g(\text{eff})}(\min))} \quad (3)$$

Giriş akımının maksimum ortalama değeri,

$$I_{g(\text{ort})\text{mak}} = \frac{2 \cdot I_{g(\text{tepe})\text{mak}}}{\pi} \quad (4)$$

Giriş geriliminin minimum tepe değeri,

$$V_{g(\text{tepe})\text{min}} = \sqrt{2} \cdot V_{g(\text{eff})}(\min) \quad (5)$$

Bağıl iletim süresi,

$$\lambda = \frac{V_c - V_{g(\text{tepe})}(\min)}{V_c} \quad (6)$$

İzin verilen akım dalgalanma miktarı % $I_L$  ise,

$$\Delta I_L = \%I_L \cdot I_{g(\text{tepe})\text{mak}} \quad (7)$$

Akımının maksimum tepe değeri,

$$I_{L(\text{tepe})\text{mak}} = I_{g(\text{tepe})\text{mak}} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (8)$$

Endüktans değeri,

$$L = \frac{V_{g(\text{tepe})(\text{min})} \lambda}{f_{sw} \cdot \Delta I_L} \quad (9)$$

Çıkış kondansatör değeri,

$$C_c = 1.1 \left( \frac{2 \cdot P_c \cdot \Delta t}{V_c^2 - V_{g(\text{tepe})(\text{min})}^2} \right) \quad (10)$$

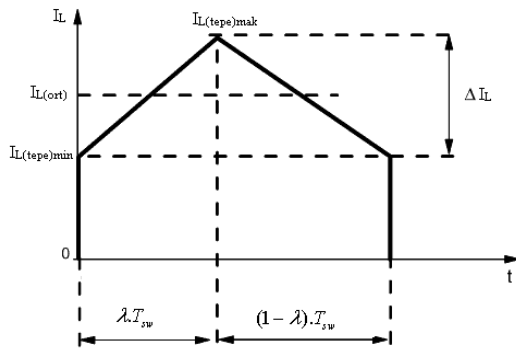
formüllerinden yararlanılarak kolayca bulunabilir. Bu hesaplamalardan sonra güç faktörü değeri,

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v_g(t) \cdot i_g(t) \cdot dt}{V_{g(\text{eff})} \cdot I_{g(\text{eff})}} \quad (11)$$

veya,

$$PF = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (12)$$

formüllerinden hesaplanarak bulunabilir. CCM çalışan geleneksel yükselticinin endüktans akımındaki değişim Şekil 4'de bir anahtarlama periyodu için gösterilmiştir.



Şekil 4: CCM çalışmada endüktans akımının değişimi.

### 3. Simülasyon Parametrelerinin Seçimi

Anahtarlama frekansı ( $f_{sw}$ ) yükselticilerin çalışma frekansından ( $f_c$ ) çok çok büyük olduğundan ( $f_{sw} \gg f_c$ ) bir anahtarlama periyodunda, temel büyüklüklerin değişmediği kabul edilmiştir. Buna göre tüm devre parametreleri yukarıda verilen (1)-(12) bağıntılarına göre, 100 kHz toplam anahtarlama frekansında, 3 kW'lık çıkış gücü için hesaplanarak Tablo 1'de gösterilmiştir. Dönüşümlü yükseltici devresinde anahtarların her biri 50 kHz anahtarlama frekansında çalışmakla birlikte devrenin toplam anahtarlama frekansı yine 100 kHz olmaktadır.

Tablo 1: Simülasyon Parametreleri

Yükseltici Tipi	Geleneksel Yükseltici	Köprüsüz Yükseltici	Dönüşümlü Yükseltici
$V_g$	220 ± %5	220 ± %5	220 ± %5
$V_c$	400 ± %5	400 ± %5	400 ± %5
$P_c$	3000 W	3000 W	3000 W
$f_{sw}$	100 kHz	100 kHz	50 kHz
$C_c$	3300 µF	3300 µF	3300 µF
$L (L1+L2)$	270 µH	270 µH	270 µH

Yükselticilerin genel karşılaştırması Tablo 2'de gösterilmiş olup, güç değeri, EMI gürültü seviyesi, çıkış dalgahı, giriş dalgahı, manyetik boyut ve verim açısından incelenmiştir [8].

Tablo 2: Yükselticilerin Genel Karşılaştırması

Yükseltici Tipi	Geleneksel Yükseltici	Köprüsüz Yükseltici	Dönüşümlü Yükseltici
Güç	< 1000 W	< 2000 W	< 3000
EMI / Gürültü	Normal	Kötü	İyi
Çıkış Gerilim Dalgalanması	Yüksek	Yüksek	Düşük
Giriş Akım Dalgalanması	Yüksek	Yüksek	Düşük
Manyetik Büyüklük	Büyük	Orta	Küçük
Verim	Kötü	Normal	Normal

Tablo 3'de yükselticilerin karşılaştırmalı analizi gösterilmiş olup, eleman sayıları ve maliyet açısından incelenmiştir.

Tablo 3: Yükselticilerin karşılaştırmalı analizi

Yükseltici Tipi	Geleneksel Yükseltici	Köprüsüz Yükseltici	Dönüşümlü Yükseltici
Ana Anahtar Sayısı	1	2	2
Hızlı Diyot Sayısı	1	2	2
Doğrultucu Diyot Sayısı	4	0	4
Endüktans Sayısı	1	2	2
Çıkış Kondansatörü	1	1	1
Toplam Eleman Sayısı	8	7	11
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek

### 4. Kontrol Yöntemi

Yükseltici devrelerin kontrol yöntemi olarak giriş akımının kolay filtrelenebilmesi ve düşük harmonikli düzgün bir sinüzoidal akım çekebilmesi için sabit anahtarlama PWM tercih edilmiştir. 100 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılan yükselticiler, tek aşamalı kontrol ile şebekeden sinüzoidal bir akım çekerken, aynı zamanda regüleli DC çıkış gerilimini de kontrol eder. Bu kontrolü sağlamak için çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve akımından faydalanılır.

Çıkış gücüne bağlı olarak şebekeden çekilecek sinüzoidal akım (1)-(12) formülleri ile hesaplanır. Oluşturulan kontrol sistemi referans akım üzerinde anahtarlama yaparak belli bir bantta bu akım ortalamasını sağlar. Geleneksel yükseltici tek bir anahtar ile tüm güç akışı kontrol edilirken. Köprüsüz ve dönüşümlü yükselticilerde 2 anahtar ile bu güç akışı sağlanır.

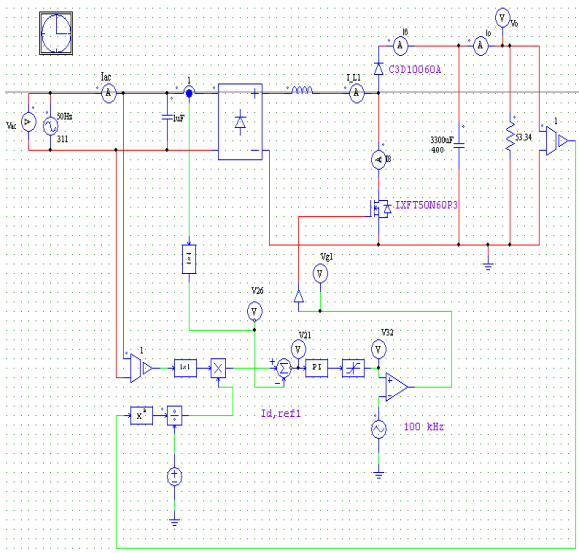
Köprüsüz yükselticide bulunan 1. anahtar pozitif yarım dalgayı, 2. anahtar negatif yarım dalgayı kontrol eder. Dönüşümlü yükseltici de ise 1. ve 2. anahtarlar 180° faz farkı ile sistemi kontrol eder. Bu kontrol ile girişten sinüzoidal bir akım çekilirken, çıkış güç akışı da kontrol edilmiş olur.

### 5. Geleneksel PFC'li Yükseltici Simülasyonu

Geleneksel PFC'li yükselticinin kontrol ve ana akım devresi Şekil 5'de gösterilmiştir. Ana akım devresi girişinde köprü

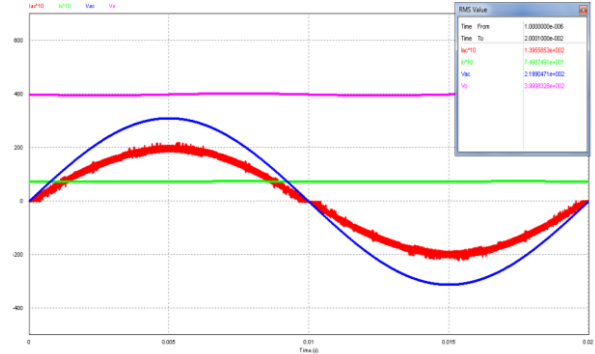
doğrultucu bulunmaktadır ve kontrol, giriş akım ve gerilimi ile çıkış geriliminin uygun bir algoritma ile kontrolü ile sağlanmaktadır.

Ana anahtar olarak 3 kW çıkış gücüne uygun 100 kHz'de çalışabilecek IXFT50N60P3 mosfeti seçilmiş olup simülasyon sonuçlarının gerçeğe uygun olması için eşdeğer referans gerilim ve direnç değerleri simülasyona eklenmiştir. Yine aynı şekilde yükseltici hızlı diyotu da gerçeğe uygun olarak C3D10060A hızlı silikon karpit (SİC) diyotu olarak simülasyona eklenmiştir. SİC diyotları, ters toparlanma süreleri ve akım değerleri ile sistemin toplam verim ve performansını arttırdığından tercih edilmiştir. Endüktans ve çıkış kondansatörü değerleri giriş geriliminin 220 V efektif değeri için hesaplanmış ve CCM çalışmaya uygun olarak Tablo 1'de gösterilen simülasyon parametrelerine göre devreye eklenmiştir. Başlangıç koşullarından sadece  $C_c$  çıkış kondansatörüne, ilk periyotta düzgün çıkış verebilmesi için, 400 V referans değer verilmiştir.



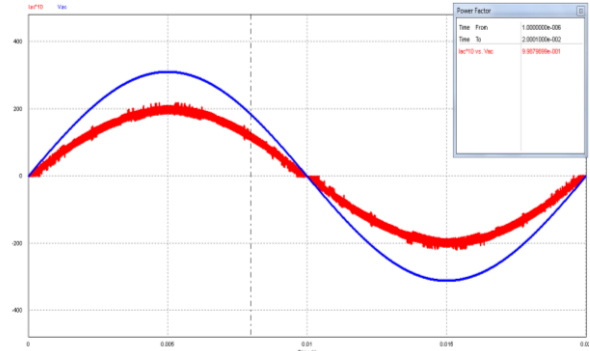
Şekil 5: Geleneksel PFC'li yükseltici simülasyon devresi.

Giriş akım ve gerilimi ile çıkış akım ve gerilimi Şekil 6'da gösterilmiş olup, akım örneklerinin daha düzgün görülebilmesi için 10 kez büyük ölçekli gösterilmiştir. Giriş ve çıkış değişkenlerinin efektif değerleri sağdaki küçük ekranda belirtilmiştir. Buna göre yaklaşık, giriş gerilimi 220 V, çıkış gerilimi 400 V, giriş akımı 14 A, çıkış akımı 7,5 A olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış güçlerinden verim ölçümü yapılırsa, giriş gücü 3065 W ve çıkış gücü 2999 W olduğundan verim % 97,8 olarak hesaplanmıştır.



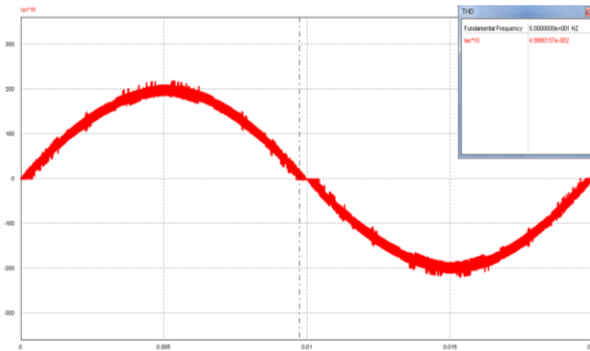
Şekil 6: Giriş ve çıkış akım-gerilim dalga şekilleri.

Şekil 7'de gösterilen giriş akım ve gerilimine bağlı güç faktörü değeri incelenirse, güç faktörü değerinin PF=0,998 olduğu görülür.



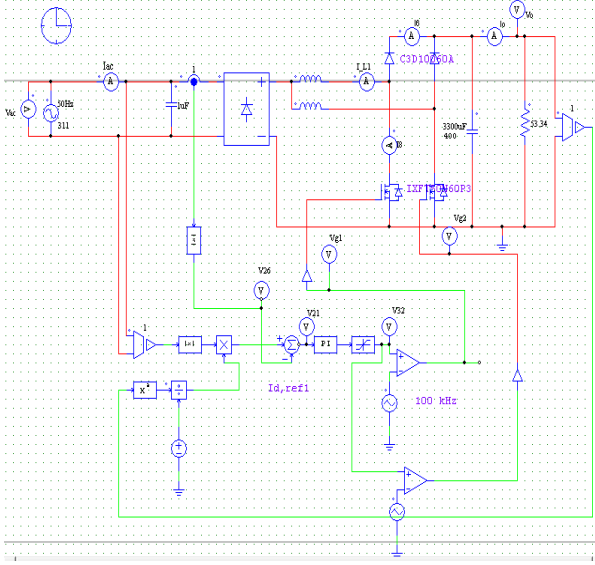
Şekil 7: Giriş akım ve gerilimine bağlı güç faktörü değeri.

Tek fazlı şebekeden çekilen akımın değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. CCM modunda çalışan geleneksel yükselticinin şebekeden çektiği akımın THDi değeri % 4,88 dir. EN61000-3-2 harmonik standartlarına göre % 5 olan sınır değerinin altında ve verimi % 97,8 ile arzulanan verim değerinin üzerindedir. Güç faktörü değeri de birim güç faktörü değerini sağlamaktadır.



Şekil 8: Giriş akımı THDi değeri.

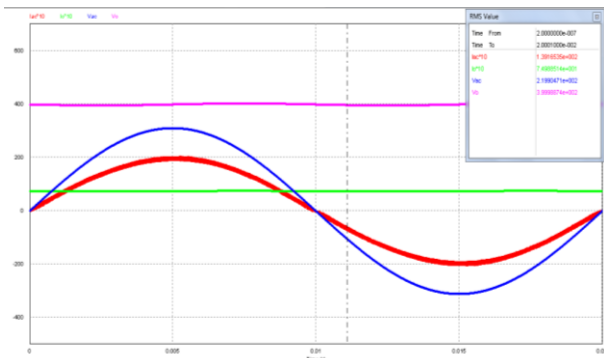




Şekil 13: Dönüşümlü PFC'li yükseltici ana akım ve kontrol devresi.

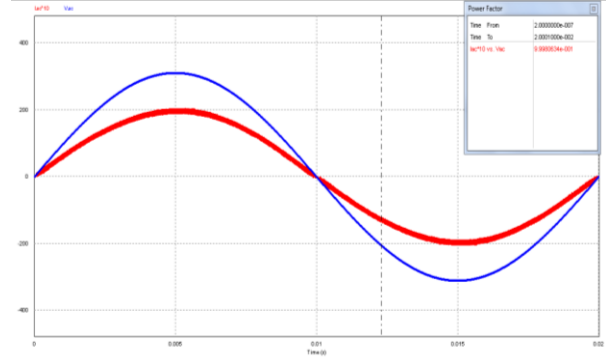
Giriş akım ve gerilimi ile çıkış akım ve gerilimi Şekil 14'de gösterilmiş olup, akım örneklerinin daha düzgün görülebilmesi için 10 kez büyük ölçekli gösterilmiştir. Giriş ve çıkış değişkenlerinin efektif değerleri sağdaki küçük ekranda belirtilmiştir. Buna göre giriş gerilimi 220 V, çıkış gerilimi 400 V, giriş akımı 13,9 A, çıkış akımı 7,5 A olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış güçlerinden verim ölçümü yapılırsa, giriş gücü 3060 W ve çıkış gücü 2999 W olduğundan verim % 98 olarak hesaplanmıştır.

Dönüşümlü yükselticide anahtarlama frekansı her bir mosfet için 50 kHz, sistemin toplam anahtarlama frekansı ise 100 kHz dir.



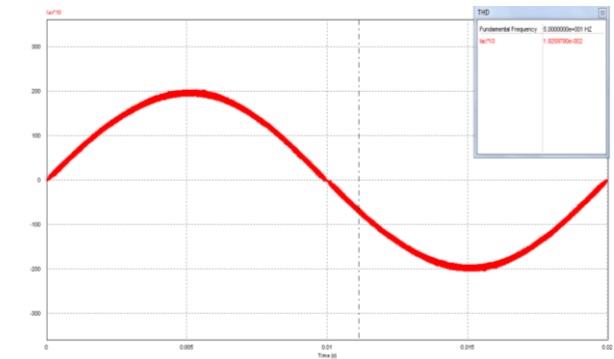
Şekil 14: Giriş ve çıkış akım-gerilim dalga şekilleri.

Şekil 15'de gösterilen giriş akım ve gerilimine bağlı güç faktörü değeri incelenirse, güç faktörü değerinin  $PF=0,999$  olduğu görülür.



Şekil 15: Giriş akım ve gerilimine bağlı güç faktörü değeri.

Tek fazlı şebekeden çekilen akımın değişimi Şekil 16'da gösterilmiştir. CCM modunda çalışan dönüşümlü yükselticinin şebekeden çektiği akımın THDi değeri % 1,93 olup, EN61000-3-2 harmonik standartlarına göre % 5 olan sınır değerinden oldukça altındadır. Dönüşümlü yükselticinin verimi, girişinde diyot köprüsü bulunduğu için, % 98 ile arzulan verim değerinin üzerindedir. Güç faktörü değeri de birim güç faktörü değerini sağlamaktadır.



Şekil 16: Giriş akımının THDi değeri.

## 8. PFC'li Yükselticilerin Performansı

Geleneksel, köprüsüz ve dönüşümlü PFC'li yükselticiler, 100 kHz toplam anahtarlama frekansında, 3 kW çıkış gücünde çalıştırılmış ve PF, THDi ve verim açısından değerlendirilmiştir. Buna göre Tablo 4'de güç faktörü, THDi ve verim açısından sonuçlar gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek verim köprüsüz yükselticide, en düşük THDi dönüşümlü yükselticide ölçülmüştür. Tüm yükselticiler güç faktörü açısından birim güç faktörü değerine ulaşmıştır.

Tablo 4: Yükselticilerin performans karşılaştırması

Yükseltici Tipi	Geleneksel Yükseltici	Köprüsüz Yükseltici	Dönüşümlü Yükseltici
PF	0.998	0.998	0.999
THDi (%)	4.88	5.05	1.93
Verim (%)	97.8	98.2	98

## 9. Sonuçlar

Bu makalede elektrikli arabalarda kullanılan Li-ion akülerin hızlı ve verimli şarjı için tercih edilebilecek temel yükseltici devrelerin simülasyonları yapılmış ve karşılaştırma sonuçları gösterilmiştir.

Geleneksel, köprüsüz ve dönüşümlü yükseltici devreleri, 3 kW çıkış gücünde ve 100 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, geleneksel yükseltici % 97.8 verim ile en düşük verim değerine sahipken, % 4.88 THDi değeri ile iki dönüştürücünün arasında yer almaktadır. Köprüsüz yükseltici % 98.2 ile en verimli sistem olmasına karşın, THDi değeri olarak, EN61000-3-2 harmonik standartlarına göre % 5 sınır olan, % 5.05 değerini almıştır. Dönüşümlü yükseltici % 98 verim değeri ile arada yer almasına karşın, % 1.93 THDi değeri ile en az harmonikli sistemdir. Güç faktörü açısından değerlendirildiğinde üç yükseltici de 0.99 değerine ulaşmıştır.

Bu yükseltici topolojileri arasında li-ion akü şarjına yönelik hızlı ve verimli bir sistem olarak dönüşümlü yükseltici daha iyi performans sergilemiştir.

## 10. KAYNAKLAR

- [1] Chakraborty, S.; Mohan, N.; , "A Comparative study of Various Single Stage PFC Converters in implementing Novel Converter Topology for Simultaneous charging and Individual Cell Balancing of Multiple Li-ion Batteries," *Telecommunications Conference*, 2005. INTELEC '05. Twenty-Seventh International , vol., no., pp.251-256, Sept. 2005
- [2] W. Huang, G. Moschopoulos, "A New Family of Zero Voltage Transition PWM Converters With Dual Active Auxiliary Circuits" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, pp. 370-379, March 2006.
- [3] Muthuramalingam, A.; Madhivanan, R.; Kalpana, R.; , "Comparative study of high performance rectifiers," *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on* , vol., no., pp.216-221, 19-21 Dec. 2006
- [4] Woo-Young Choi; Jung-Min Kwon; Eung-Ho Kim; Jong-Jae Lee; Bong-Hwan Kwon; , "Bridgeless Boost Rectifier With Low Conduction Losses and Reduced Diode Reverse-Recovery Problems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.2, pp.769-780, April 2007
- [5] Huber, L.; Yungtaek Jang; Jovanovic, M.M.; , "Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.23, no.3, pp.1381-1390, May 2008
- [6] Woo-Young Choi; Jung-Min Kwon; Bong-Hwan Kwon; , "An improved bridgeless PFC boost-doubler rectifier with high-efficiency," *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* , vol., no., pp.1309-1313, 15-19 June 2008
- [7] Tao Qi; Lei Xing; Jian Sun; , "Dual-Boost Single-Phase PFC Input Current Control Based on Output Current Sensing," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.24, no.11, pp.2523-2530, Nov. 2009
- [8] Beltrame, F.; Roggia, L.; Schuch, L.; Pinheiro, J.R.; , "A comparison of high power single-phase power factor correction pre-regulators" *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp 625-629, May 2010
- [9] Etezadi-Amoli, M.; Choma, K.; Stefani, J.; , "Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.3, pp.1883-1887, July 2010
- [10] Musavi, F.; Eberle, W.; Dunford, W.G.; , "A high-performance single-phase AC-DC power factor corrected boost converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE* , vol., no., pp.3588-3595, 12-16 Sept. 2010
- [11] Musavi, F.; Eberle, W.; Dunford, W.G.; , "Efficiency evaluation of single-phase solutions for AC-DC PFC boost converters for plug-in-hybrid electric vehicle battery chargers," *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE* , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010
- [12] Akın, B.; Bodur, H.; , "A New Single-Phase Soft-Switching Power Factor Correction Converter," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.26, no.2, pp.436-443, Feb. 2011
- [13] Musavi, F.; Eberle, W.; Dunford, W.G.; , "A high-performance single-phase bridgeless interleaved PFC converter for for plug in hybrid electric vehicle battery chargers," *Industry Application, IEEE Transactions on* , vol.47, no.4, pp.1833-1843, Aug. 2011