

Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselten Dönüştürücü Tabanlı Elektrikli Araç Şarj Ünitesi Tasarımı ve Model Öngörülü Yöntem ile Kontrolü

Naki GÜLER^{1*}, Uğur FESLİ², Samet BİRİCİK³

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

³Lefke Avrupa Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Lefke, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 05/08/2024
Düzeltilme: 28/09/2024
Kabul: 23/10/2024

Keywords

Model Öngörülü Kontrol
Yükselten dönüştürücü
Elektrikli araç şarj cihazı

Article Info

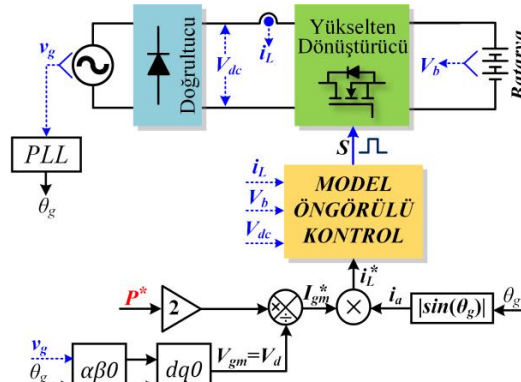
Research Article
Received: 05/08/2024
Revision: 28/09/2024
Accepted: 23/10/2024

Keywords

Model Predictive Control
Boost converter
Electric vehicle charger

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu makalede, şebekeden beslenen Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin kararlı durum ve referans güç değeri ve şebeke gerilimindeki adım değişimi gibi dinamik geçişler sırasında akım kontrolü yapabildiğini göstermektedir. / In this paper, a Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for grid-fed Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers. The results show that the proposed method is capable of current control during steady-state and dynamic transitions, such as step change in reference power and grid voltage.



Şekil A: Önerilen kontrol yönteminin blok şeması / Figure A: The block schema of the proposed control method

Önemli noktalar (Highlights)

- Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. / A Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers.
- Önerilen sistemin çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. / It is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels with a minimum 93% overall efficiency.
- Sonuçlar güç faktörü düzeltmesinin %3,46 toplam harmonik bozulma ile sağlandığını göstermektedir. / The results show that the power factor correction is provided with 3.46% total harmonic distortion.

Amaç (Aim): Bu makalenin temel amacı, PFC yükseltici dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için bir MPC yöntemi geliştirmektir. / The main intention of the paper is to develop an MPC method for PFC boost converter-based electric vehicle chargers.

Özgünlük (Originality): Önerilen sistem çeşitli voltaj seviyelerine sahip bataryaların şarj edilmesi için uygundur. / The proposed system is suitable for charging batteries that have various voltage levels.

Bulgular (Results): Önerilen sistemin çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. / It is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels with a minimum 93% overall efficiency.

Sonuç (Conclusion): Sonuçlar GFD ve akü şarjının başarılı bir şekilde sağlandığını doğrulamaktadır. / The results verify that the PFC operation and battery charge are successfully achieved.



Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselten Dönüştürücü Tabanlı Elektrikli Araç Şarj Ünitesi Tasarımı ve Model Öngörülü Yöntem ile Kontrolü

Naki GÜLER^{1*}, Uğur FESLİ², Samet BİRİCİK³

¹Gazi University, Technology Faculty, Department of Electrical-Electronic Engineering, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electronic and Automation, Ankara, Türkiye

³European University of Lefke, Department of Electrical and Electronic Engineering, Lefke, Turkish Republic of Northern Cyprus

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 05/08/2024
Düzeltilme: 28/09/2024
Kabul: 23/10/2024

Anahtar Kelimeler

Model Öngörülü Kontrol
Yükselten dönüştürücü
Elektrikli araç şarj cihazı

Öz

Bu makalede, şebekeden beslenen Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. GFD yükselten dönüştürücü kullanmanın arkasındaki temel fikir, elektrikli araçlarda yerleşik bulunan bir şarj cihazı kullanma zorunluluğunu ortadan kaldırmaktır. Güç dönüştürücü, 10kW anma gücüne sahip bir konut tipi şarj cihazı olarak kullanıma uygundur. GFD yükselten dönüştürücünün kontrolü MÖK ile sağlanmıştır. Önerilen kontrol stratejisinin performansı, MATLAB/Simulink platformunda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin kararlı durum ve referans güç değeri ve şebeke gerilimindeki adım değişimi gibi dinamik geçişler sırasında akım kontrolü yapabildiğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen sistemin 400V ve 700V gibi çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. Bununla birlikte, sonuçlar güç faktörü düzeltmesinin %3,46 toplam harmonik bozulma ile sağlandığını göstermektedir.

Power Factor Correction Boost Converter-Based Electric Vehicle Charger Design and Control with Model Predictive Method

Article Info

Research Article
Received: 05/08/2024
Revision: 28/09/2024
Accepted: 23/10/2024

Keywords

Model Predictive Control
Boost converter
Electric vehicle charger

Abstract

In this paper, a Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for grid-fed Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers. The main idea behind using a PFC boost converter is to eliminate the necessity of using an onboard charger in EVs. The power converter is suitable for use as a residential charger with 10kW rated power. The control of the PFC boost converter is achieved by MPC. The performance of the proposed control strategy is investigated by simulation studies performed on the MATLAB/Simulink platform. The results show that the proposed method is capable of current control during steady-state and dynamic transitions, such as step change in reference power and grid voltage. Also, it is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels such as 400V and 700V with a minimum 93% overall efficiency. In addition, the results show that the power factor correction is provided with 3.46% total harmonic distortion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya şarj sistemlerinin önemini artırmıştır. Şarj sistemlerinin tasarımı ve güç sistemleri üzerindeki etkileri güncel çalışma konuları arasında yer almaktadır [1], [2]. Hem alternatif gerilim hem de doğru gerilim çıkışlı şarj üniteleri yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Alternatif gerilim çıkışlı şarj ünitelerinin düşük maliyetli ve basit yapıda olması ev tipi uygulamalarda tercih edilmesindeki temel unsurlardandır. Alternatif gerilim çıkışlı

ünitelerinden elektrikli araca uygulanan gerilim, araç üzerinde yerleşik bulunan şarj ünitesi tarafından doğru gerilime çevrilmektedir [4]. Ayrıca, bataryaya aktarılacak şarj gücü de bu yerleşik üniteler ve batarya yönetim sistemi ile belirlenmektedir. Dolayısıyla, alternatif gerilim çıkışlı şarj üniteleri için araç üzeri yerleşik şarj ünitesi kullanımı bir zorunluluktur. Ancak, doğru gerilim çıkışlı şarj üniteleri için araç üzeri yerleşik şarj ünitesi zorunluluğu bulunmamaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların farklı gerilim ve güç seviyelerinde olması doğru gerilim

çıkışlı şarj sistemlerinde farklı gereksinimlere yol açmaktadır. Şarj sistemi çıkış gerilim seviyesinin geniş bir bant aralığındaki bataryaları şarj edebilecek şekilde ayarlanabilir olması, farklı güç dönüştürücüsü topolojilerinin kullanımında önemli bir etken olmuştur.

Doğru gerilim şarj ünitelerinde hem izoleli hem de izolesiz güç dönüştürücüleri kullanılmaktadır [5], [6]. Güvenlik amacıyla rezonans, iki yönlü çift aktif köprülü ve akım kaynaklı gibi birçok izoleli topoloji şarj ünitelerinde kullanılmıştır [5], [7]–[10]. [10]'da Vienna doğrultucu ve çift aktif köprülü dönüştürücü tabanlı şarj ünitesi önerilmiştir. Şebeke gerilimi doğrultulmuş ve şebeke-araċ arası izolasyon çift aktif köprülü dönüştürücü tarafından sağlanmıştır. [11]'de 800V gerilim sınıfındaki elektrikli araçlar için önerilen araç üzeri yerleşik şarj cihazında 1.25kV gerilim seviyesine ulaşmak için üç seviyeli çift aktif köprü dönüştürücü kullanılmıştır. Benzer olarak yüksek gerilim girişine sahip sistemlerden 350-400V gerilim aralığındaki bataryaları şarj etmek amacıyla seri-giriş paralel-çıkışlı güç dönüştürücüsü konfigürasyonları da kullanılmaktadır [5]. Bu izoleli topolojilerde kullanılan yüksek frekanslı anahtarlamaya uygun transformatörlerin tasarımı ve üretimi zorluk olarak ortaya çıkarsa da araç-şebeke arasında izolasyon sağlanması için büyük öneme sahiptir. Ancak, son yıllarda yayınlanan Society of Automotive Engineers J1772 ve Automotive Industry Standard 138 gibi standartlarda güvenlik gereksinimi açısından izolasyonun bir zorunluluk olmadığı vurgulanmıştır [12], [13]. Dolayısıyla, yükselten, alçaltan-yükselten, Totem-pole, dönüştürücüler gibi izolesiz güç dönüştürücüleri de elektrik araç şarj sistemlerinde kullanılmıştır [14]–[17]. [16]'da 250V ve 400V gerilim değerlerine sahip bataryaların şarjı ve motor sürücü için izolesiz bir araç üzeri yerleşik şarj ünitesi geliştirilmiştir. Önerilen güç dönüştürücüsü kontrollü doğrultucu olarak çalıştırılarak batarya şarjı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, güç dönüştürücüsü motor kontrolcü olarak da kullanılarak tümleşik çalışma sağlanmıştır. Benzer amaçla Totem-pole dönüştürücü tabanlı izolesiz güç dönüştürücüsü modeli de kullanılmıştır [14].

Elektrikli araç şarj sistemlerinde akım ve/veya gerilim kontrolü güvenli bir şarj için gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, şarj sistemlerinde kullanılan güç dönüştürücüsü topolojilerinin yanı sıra, kontrol yöntemleri de büyük öneme sahiptir. [18]'de Araç üzerindeki yerleşik şarj ünitesi kullanılarak, bataryanın şarj ve deşarj durumlarını yönetmek için bir çalışma durumu belirleme algoritması geliştirilmiştir. Akım

ve gerilim kontrol aşamalarının gerçekleştirilmesi için bağımsız PI kontrolcüler kullanılmıştır. Önerilen yapı düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilirken, şebekeden çekilen akım kontrolü için güç faktörü düzeltme işlemi yapılmamıştır. Şebeke beslemeli alçaltan-yükselten dönüştürücü tabanlı izolesiz bir şarj ünitesi önerilen çalışmada, gerilim kontrolü için PI kontrolcü önerilmiştir [8]. Kararlı durum ve geçiş koşullarında yapılan testlerde kontrolün sağlandığı görülmüştür. Geçiş süresi 100ms civarında gerçekleştirilirken, güç faktörü düzeltme işlemi %3,5 harmonik bozulma ile sağlanmıştır. Kayan Kipli Kontrol (KKK) tekniği hızlı dinamik cevap ve sistem parametrelerine duyarlı olması avantajlarıyla güç dönüştürücülerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan, çatırdama sorunu KKK yönteminin uygulanmasındaki en büyük zorluk olarak görülmektedir. Bu durumun giderilmesi için KKK yöntemiyle Üstün Burulma Algoritması (ÜBA) birleştirilerek çatırdamalar azaltılmaktadır [19]. [5]'te önerilen seri-giriş paralel-çıkışlı izoleli güç dönüştürücülerinden oluşan batarya şarj ünitesinin ÜBA-KKK yöntemiyle kontrolü sağlanmıştır [9]. Şarj ünitelerinin kontrol sinyalleri merkezi olarak üretilmiş ve çıkışta akım girişte ise gerilim paylaşımı başarıyla sağlanmıştır. Kayan Kipli Kontrolcünün yanı sıra Model Öngörülü Kontrol tekniği de hızlı dinamik cevabı ve hassas kontrol sağlaması avantajlarıyla güç dönüştürücülerinin kontrolü için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu avantajlarının yanı sıra, MÖK tekniğinin sistem parametrelerine duyarlı olması kontrolcü performansını etkilemektedir. Bu durum bir dezavantaj olarak ortaya çıksa da son yıllarda yapılan birçok çalışma bu olumsuz etkinin sınırlı olduğunu ispatlanmıştır [20], [21]. [16]'da geliştirilen izolesiz şarj ünitesinin kontrolü için MÖK önerilmiştir. MÖK'ün hızlı dinamik cevabı ve sıfır geçiş noktalarında oluşan bozulmaların en aza indirgenmesiyle güç kalitesinde iyileştirme sağlanmıştır. Farklı gerilim seviyelerine sahip batarya koşullarında yapılan deneysel çalışmalar, birim güç faktörü ile çalışmanın sağlandığını ve akım harmoniklerinin %1,89 ile %3,5 arasında değiştiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, elektrikli araçlar üzerinde yerleşik şarj ünitelerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmak üzere güç faktörü düzeltmeli yükselten dönüştürücü tabanlı bir şarj ünitesinin kontrolü için Model Öngörülü Yöntem önerilmiştir. Güç dönüştürücüsü ve önerilen kontrol yapısı araç üzeri yerleşik şarj cihazı olarak da çalışabilir. Ancak, araç üzerinde yerleşik olan şarj cihazları toplam ağırlığı artırmakta ve elektrikli araçları karmaşık bir sistem haline getirmektedir. Bu nedenle, ev tipi doğru

gerilim şarj cihazı olarak kullanımının daha uygun olacağı önerilmiştir. Güç dönüştürücüsü girişinde kontrolsüz bir tam köprü doğrultucu bulunmaktadır. Doğrultucu çıkış akımı aynı zamanda yükseltilen dönüştürücü giriş akımı olmakla birlikte, kontrolü önerilen MÖK yöntemiyle sağlanmıştır. Ayrıca, güç faktörü düzeltme işleminin de sağlanması için akım referansının dalga şekli, şebeke gerilim dalga şekliyle aynı formda üretilmiştir.

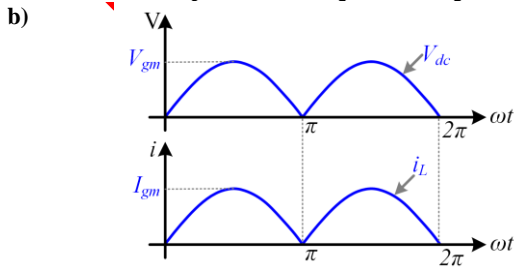
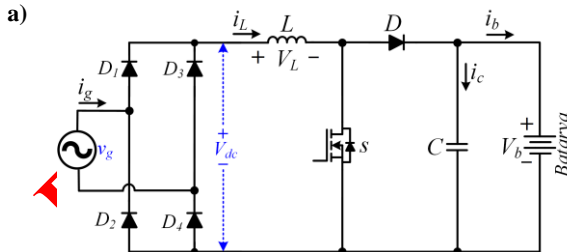
2. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ MODELİ (POWER FACTOR CORRECTION BOOST CONVERTER MODEL)

Şebeke beslemeli bir yükseltilen dönüştürücü tabanlı batarya şarj sisteminin devre modeli Şekil 1(a)'da görülmektedir. Şebeke gerilimi köprü tipi tam dalga doğrultucu ile doğrultulduktan sonra yükseltilen dönüştürücü üzerinden bataryaya güç akışı sağlanmaktadır. Şekil 1(b)'de doğrultucu çıkış gerilimi ve akımına ait grafikler görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, doğrultucu çıkış akımının ideal durumda gerilimle aynı fazda ve dalga formunda olması güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler için bir gerekliliktir. Diyotların ideal olduğu varsayıldığında, doğrultucu çıkış geriliminin (V_{dc}) tepe değeri Denklem 1'de verilen şebeke geriliminin tepe değerine (V_{gm}) eşit olmaktadır.

$$v_g = V_{gm} \sin(\omega t) \quad (1)$$

Doğrultucu çıkış gerilimi pozitif ($0 \leq \omega t \leq \pi$) ve negatif ($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$) alternanslar için Denklem 2'deki gibi ifade edilebilir.

$$V_{dc} = \begin{cases} V_{gm} \sin(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -V_{gm} \sin(\omega t) & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$



Şekil 1. a) Şebeke beslemeli yükseltilen dönüştürücü tabanlı batarya şarj sistemi devre şeması b) Doğrultucu çıkış gerilim ve akım grafikleri (a) Circuit diagram of the grid-fed boost converter based battery charging system b) Rectifier output voltage and current graphs)

Şekil 1(b)'den görüldüğü üzere, yükseltilen dönüştürücü giriş akımı (i_L), V_{dc} ile aynı dalga formuna sahip olup, tepe değeri (I_{gm}) Denklem 3'te verilen şebeke akımının tepe değerine eşit olmaktadır.

$$i_g = I_{gm} \sin(\omega t) \quad (3)$$

Doğrultucu tarafında şebeke gerilim polaritesine bağlı olarak iletim-kesim durumları oluşurken, yükseltilen dönüştürücü tarafında s anahtarının durumuna bağlı olarak akım ve gerilim seviyeleri değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, dönüştürücü tarafı s anahtarının iletim ($S=1$) ve kesim ($S=0$) durumları için ayrı ayrı analiz edilir. Burada, S anahtarlama sinyalini ifade etmektedir. Anahtarın iletimde olduğu durum için bobin gerilimi (V_L) Denklem 4'teki gibi ifade edilebilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \quad (4)$$

Anahtarın iletimde olduğu durumda batarya akımı (i_b) ise Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$i_b = -i_c \quad (5)$$

Anahtarın kesimde olduğu durum için V_L Denklem 6'daki gibi yazılabilir.

$$V_L = V_{dc} - V_b \quad (6)$$

Burada, V_b batarya gerilimini ifade etmektedir. Batarya akımı ise Denklem 7 ile hesaplanabilir.

$$i_b = i_L - i_c \quad (7)$$

s anahtarının iletim ve kesim durumları için genel bir ifadeyle V_L gerilimi Denklem 8'deki gibi yazılabilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} - V_b(1 - S) \quad (8)$$

Benzer olarak, i_b Denklem 9 ile ifade edilebilir.

$$i_b = i_L(1 - S) - i_c \quad (9)$$

3. KONTROLÇÜ TASARIMI (DESIGN OF CONTROLLER)

Güç dönüştürücüsü çıkışına bağlı bataryanın şarjı için şebekeden aktarılan gücün kontrol edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, Şekil 1(a)'daki güç dönüştürücüsünün şebekeden çektiği akımda güç faktörü düzeltme işleminin gerçekleştirilebilmesi için giriş akımının kontrol edilmesi bir gerekliliktir. Bu aşamaların gerçekleştirilmesi için referans güç değerine bağlı i_L akımının referansının oluşturulması ve model öngörülü yöntem ile kontrolü aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Referans Akım Sinyalinin Üretilmesi

(Generation of Reference Current Signal)

Önceki bölümde belirtildiği üzere, dönüştürücünün güç faktörü düzeltme durumunda çalışabilmesi için yükselten dönüştürücü giriş akımının Şekil 1(b)'de verilen ideal i_L gibi doğrultucu çıkış gerilimiyle aynı fazda ve dalga formunda olması gerekmektedir. Bu nedenle, yükselten dönüştürücü giriş akımı referans sinyalinin (i_L^*) birim güç faktörünü sağlayacak şekilde üretilmesi gerekmektedir. Doğrultucu çıkışı için birim referans sinyal (i_a) Denklem 10'daki gibi şebeke tarafındaki birim sinüs sinyalinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir.

$$i_a = |\sin(\theta_g)| \quad (10)$$

Burada, θ_g şebeke fazına bağlı olarak üretilen açılı sinyali ifade etmekle birlikte, bu makalede klasik faz kilitlemeli çevrim (PLL) kullanılarak üretilmiştir. i_L akımının referansı Denklem 10'daki birim referans sinyal kullanılarak Denklem 11 elde edilmiştir.

$$i_L^* = I_{gm}^* i_a, \quad i_L^* = I_{gm}^* |\sin(\theta_g)| \quad (11)$$

Burada, referans şebeke akımının genliği I_{gm}^* ile ifade edilmektedir. Sistemin belirlenen bir referans güç değeri (P^*) için kontrol edileceği göz önünde bulundurulduğunda, temel güç eşitliğinden faydalanılarak Denklem 12 ile I_{gm}^* elde edilebilir.

$$I_{gm}^* = \frac{2P^*}{V_{gm}} \quad (12)$$

V_{gm} değeri bir fazlı şebeke gerilimine önce Clarke dönüşümü ($\alpha\beta 0$) ve devamında Park ($dq0$) dönüşümü uygulanarak elde edilmiştir [22]. Park dönüşümü sonucunda elde edilen V_d bileşeni V_{gm} değerini vermektedir. Denklem 12, Denklem 11'deki I_{gm}^* yerine konulduğunda Denklem 13'teki gibi referans akım sinyali üretilir.

$$i_L^* = \frac{2P^*}{V_{gm}} |\sin(\theta_g)| \quad (13)$$

3.2. Model Öngörülü Kontrol Tasarımı (Design of Model Predictive Control)

Yükselten dönüştürücü giriş akımı model öngörülü yöntem kullanılarak kontrol edilmiştir. Model öngörülü kontrol, sistemin matematiksel modeli, tahmin, maliyet fonksiyonu ve minimizasyon olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilebilir. Sistemin matematiksel modeli Bölüm 2'de elde edilmişti. Yükselten dönüştürücü giriş akımının kontrolü için i_L akımının bir sonraki örnekleme süresi için tahmini Denklem 14'teki gibi İleri Euler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$\frac{di_L}{dt} \cong \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} \quad (14)$$

Burada, T_s kontrol yazılımının örnekleme süresini, $(k+1)$ bir sonraki örnekleme süresini, (k) mevcut örnekleme süresini ifade etmektedir. Denklem 14 düzenlenecek olursa, tahmin edilen akım değeri Denklem 15 ile hesaplanabilir.

$$i_L(k+1) \cong i_L(k) + T_s \frac{di_L}{dt} \quad (15)$$

Denklem 8'deki türev ifadesi Denklem 15'te yerine konulursa, tahmin denklemi Denklem 16'daki gibi yazılabilir.

$$i_L(k+1) \cong i_L(k) + \frac{T_s}{L} [V_{ac} - V_b(1 - S_j)] , \quad (16)$$

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{eğer } j = 1 \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } j = 2 \text{ ise} \end{cases}$$

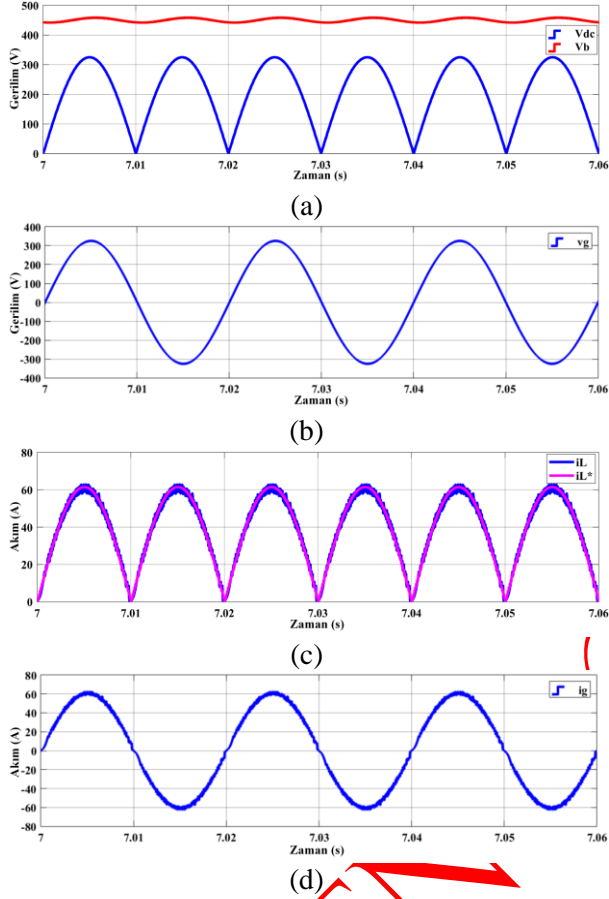
Tahmin edilen akım değeri elde edildikten sonraki tasarım aşaması maliyet fonksiyonunun oluşturulmasıdır. Tahmin tabanlı olmayan kontrol yöntemlerinde hata fonksiyonu referans ile ölçülen değerler arasındaki farka göre yazılırken, Model Öngörülü Kontrol yönteminde maliyet fonksiyonu olarak adlandırılır ve referans ile tahmin edilen değerler arasındaki fark ile ifade edilir. Maliyet fonksiyonu, yükselten dönüştürücü giriş akım kontrolü için Denklem 17'deki gibi yazılabilir.

$$g_i(k+1) = |i_L^*(k) - i_L(k+1)| \quad (17)$$

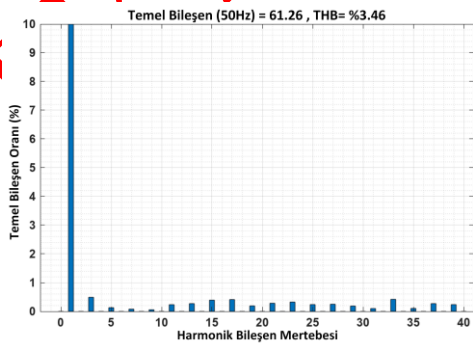
i_L , L bobininden anahtarlamaya bağlı olarak geçecek bir akım sinyali olduğundan saf bir doğru akım olmamaktadır. Bu nedenle, Denklem 17'deki maliyet fonksiyonunun sonucu çoğunlukla sıfıra yakın olmamakla birlikte, maksimum değeri bobin akımındaki dalgalanma değerine bağlıdır. Dolayısıyla, anahtarlama frekansı buradaki maksimum hata üzerinde etkin rol oynamaktadır. Anahtarlama frekansının düşük olması maksimum hatayı artırırken tam tersi de geçerlidir. Bu durum, Model Öngörülü Kontrolcünün hatayı minimuma indirmek için anahtar pozisyonunu sürekli değiştirmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, anahtarlama frekansını artırmaktadır. Anahtarlama sinyalinin periyot süresi minimum $T_s/2$ olabilmektedir. Bu durum, anahtarlama kayıplarının artmasına ve bazı durumlarda kontrolcü performansında bozulmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle, anahtarlama sinyalinin değişimini azaltmak için Model Öngörülü Kontrolde Denklem 18'deki gibi ikinci bir maliyet fonksiyonu eklenmektedir.

$$g_s(k) = |S_j(k) - S_j(k-1)| \quad (18)$$

görülmektedir. Dolayısıyla, güç faktörü düzeltme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği açıktır. Buna ek olarak, şebekeden çekilen akımdaki Toplam Harmonik Bozulma (THB) sonucu Şekil 4'te görülmektedir. THB %3,46 olarak ölçülmüş olup, uluslararası standartlarda tanımlanan limitlerin altındadır [23].



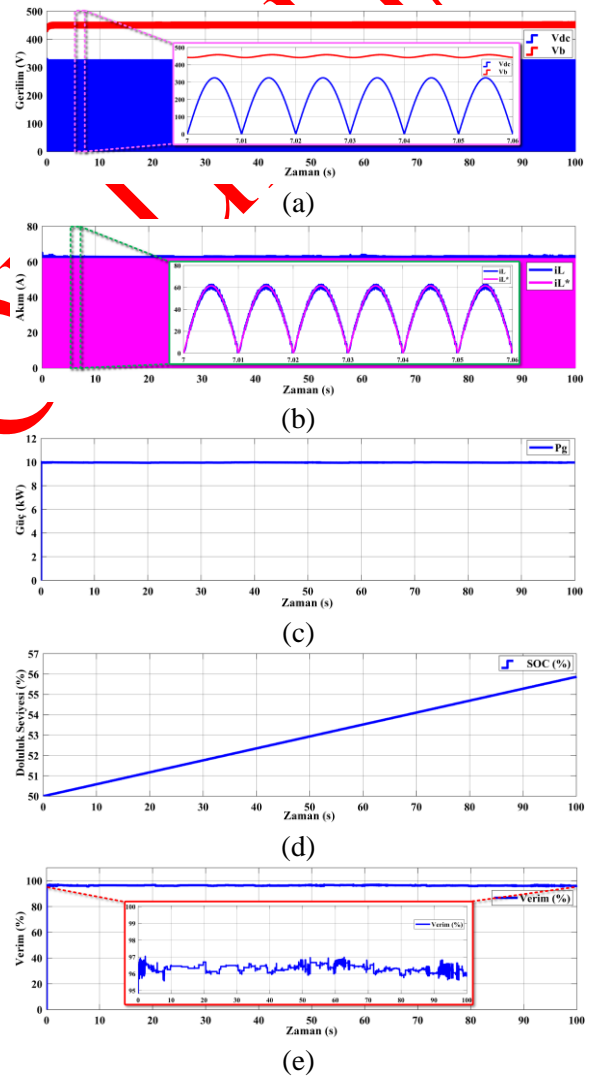
Şekil 3. Kararlı durum sonuçları a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Şebeke gerilimi c) Yükselten dönüştürücü giriş akımı d) Şebeke akımı (Steady-state results a) Rectifier output and battery voltages b) Grid voltage c) Input current of the boost converter d) Grid current)



Şekil 4. Şebeke akımındaki toplam harmonik bozulma (Total harmonic distortion in the grid current)

Şekil 3'teki çalışma koşullarında batarya şarj durumunun incelenmesi için yapılan simülasyon çalışmasına ait sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekil

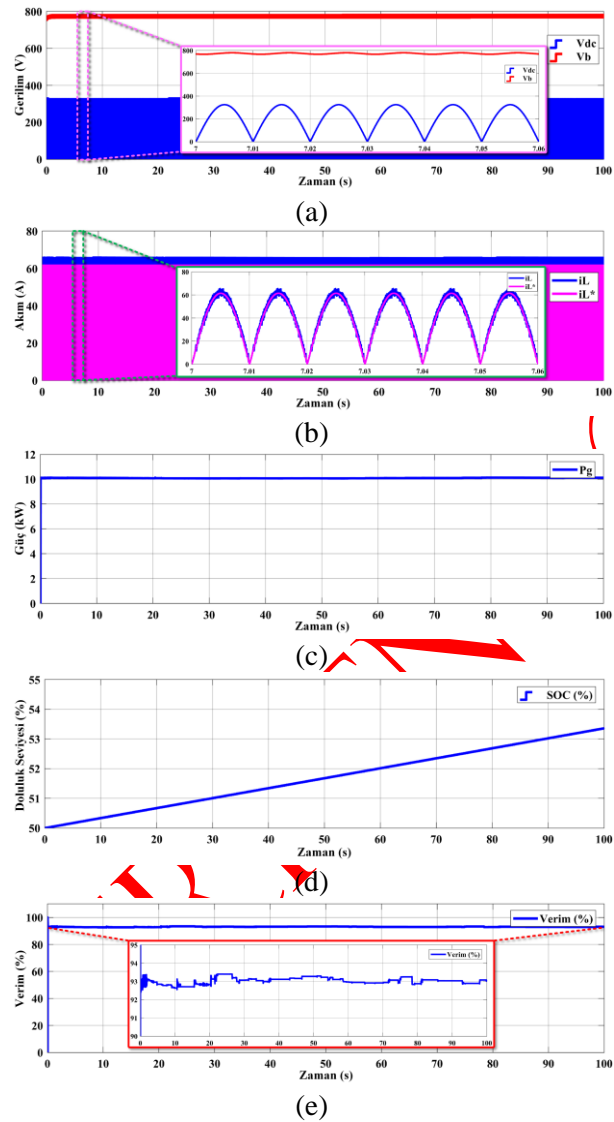
5(a)'da görüldüğü üzere, simülasyon süresi boyunca tam dalga doğrultucu çıkış gerilimi ve batarya gerilimi aynı seviyededir. Benzer olarak, i_L ve referansının aynı seviyede tutulduğu ve kontrolün gerçekleştiği Şekil 5(b)'de görülmektedir. Ölçülen güç değerine ait grafik Şekil 5(c)'de görülmektedir. Simülasyon süresi boyunca 10kW güç aktarımı başarılı bir şekilde sağlanmaktadır. Şekil 5(b) ve (c)'deki bu sonuçlar önerilen kontrol algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığının göstergesidir. Bununla birlikte, Şekil 5(d)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, başlangıçta %50 olan batarya doluluk seviyesi aktarılan güç ile artarak simülasyon sonucunda yaklaşık %56 seviyesine ulaşmaktadır. Bu durum, batarya şarjının gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 5. Batarya şarj durumuna ait sonuçlar (400V nominal batarya gerilimi altında) a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı c) Şebekeden çekilen güç d) Batarya doluluk seviyesi e) Sistem verimi (Results for battery charge state (under 400V nominal battery voltage) a) Output voltage of the rectifier and battery b) Input and reference current of boost converter c) Grid power d) State of charge of the battery e) System efficiency)

Güç dönüştürücülerinin performansı açısından diğer bir unsur da sistem verimidir. Şekil 5(e)'de görüldüğü üzere, ortalama sistem verimi %96'nın üzerindedir. Sistem verimini etkileyen kayıplar, hem anahtarlama elemanı hem de diyot ve bobin iç direnci gibi diğer sistem bileşenlerinde meydana gelmektedir.

Güç dönüştürücüsünün farklı batarya gerilim seviyelerinde çalışabilirliğini incelemek amacıyla batarya nominal gerilimi 700V seçilerek elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Diğer sistem parametreleri Şekil 3'teki teste kullanılanlar ile aynıdır.

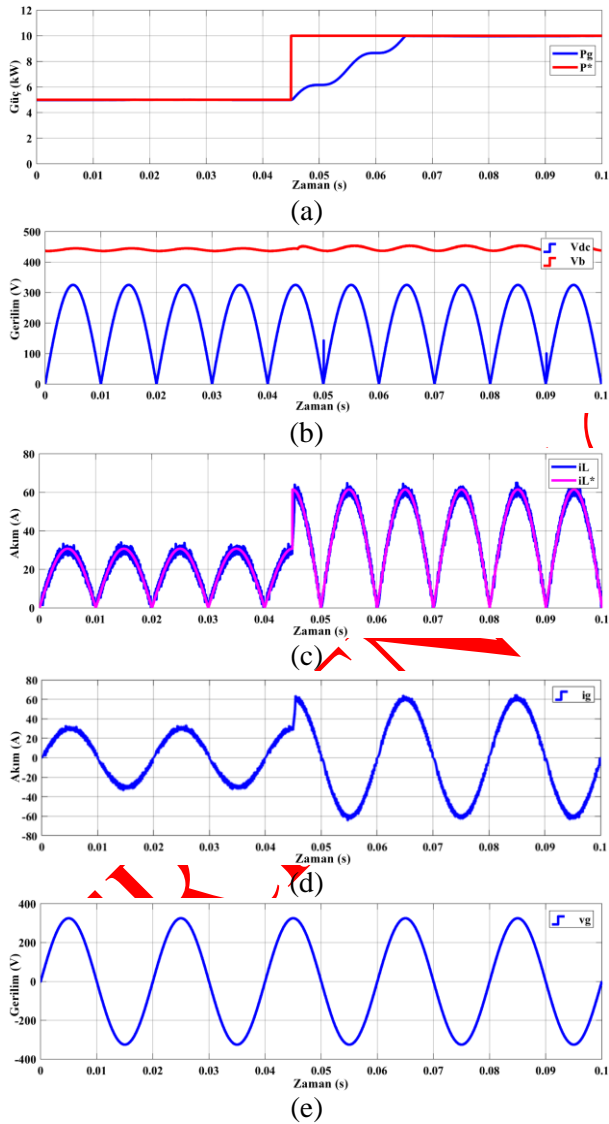


Şekil 6. Batarya şarj durumuna ait sonuçlar (700V nominal batarya gerilimi altında) a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı c) Şebekeden çekilen güç d) Batarya doluluk seviyesi e) Sistem verimi (Results for battery charge state (under 700V nominal battery voltage) a) Output voltage of the rectifier and battery b) Input and reference current of boost converter c) Grid power d) State of charge of the battery e) System efficiency)

Şekil 6(a)'da görüldüğü üzere, doğrultucu çıkış geriliminin tepe değeri şebeke gerilimi tepe değeriyle aynı seviyededir ($230\sqrt{2}$). Batarya gerilimi ise hem normal doluluk oranının %50 olması hem de şarj durumunda olması sebebiyle nominal değerinin üzerinde ve ortalama 775V seviyesindedir. Şekil 3'teki çalışma koşullarıyla aynı şebeke gerilimi ve güç referansı (10kW) kullanıldığından, i_L^* referansının tepe değerinin de aynı seviyede (61.5A) olduğu Şekil 6(b)'de görülmektedir. Bununla birlikte, akım kontrolünün bu durumda da Model Öngörülü Yöntem ile başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği detay grafiğinde görülmektedir. i_L akımı üzerindeki dalgalanmanın Şekil 3 ve 5'e göre bir miktar artış gösterdiği yine grafikten görülmektedir. Bu durum, gerilim yükseltme oranının artışı kaynaklanmaktadır. Şekil 6(c)'de görüldüğü üzere, bu çalışma koşullarında da simülasyon süresi boyunca şebekeden çekilen güç değeri 10kW seviyesinde tutulmuştur. Başlangıç doluluk oranı %50 olan bataryanın şebekeden aktarılan güç ile şarj olarak simülasyon sonunda yaklaşık %53,4 seviyesine ulaşmıştır. 700V nominal batarya gerilimi koşullarında yapılan bu simülasyon süresince ortalama sistem veriminin %93 olduğu Şekil 6(e)'de görülmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen bu sonuçlar genel olarak yorumlanacak olursa, güç faktörü düzeltilmeli yükselten dönüştürücü tabanlı batarya şarj sisteminin 400V ve 700V nominal batarya gerilimi koşullarında çalışmaya uygun olduğu görülmüştür. Önerilen kontrol yöntemi her iki durumda da başarılı bir şekilde akım kontrolü sağlamıştır. Bununla birlikte, sistem veriminin 400V nominal batarya gerilimi koşulunda %96, 700V durumunda ise %93 olduğu görülmüştür. Bu fark yükselten dönüştürücü veriminin gerilim kazancına bağlı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır [24].

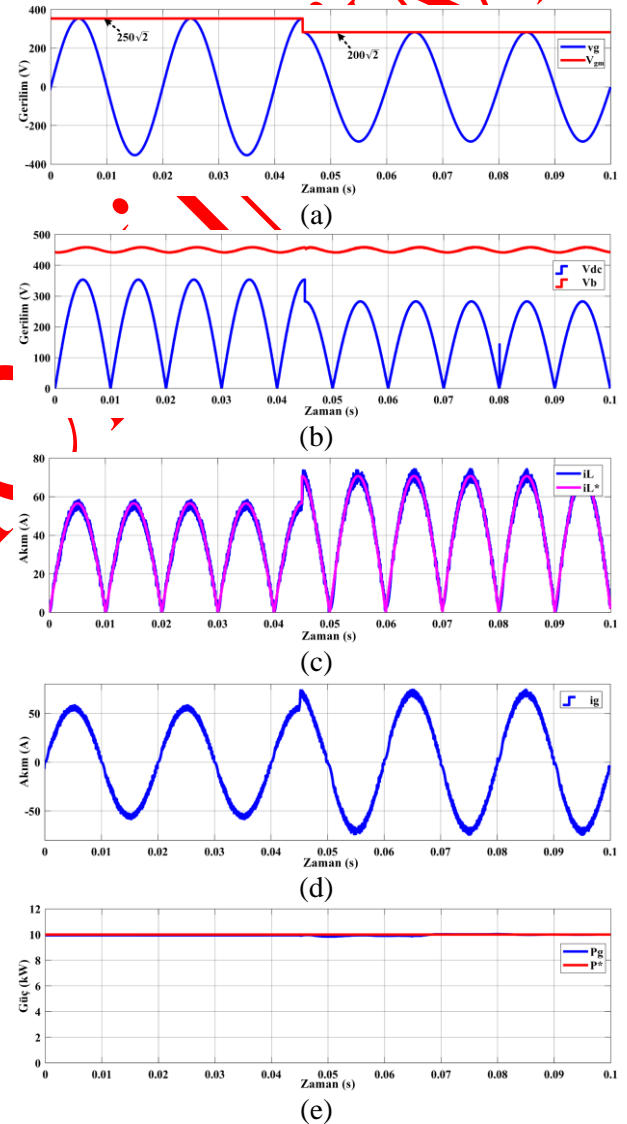
Kontrol yöntemlerinin performansları açısından diğer önemli bir unsur da geçici durumlara karşı verdiği dinamik cevaplardır. Bu amaçla, önerilen kontrol yönteminin dinamik performansı güç referansının değişimi ve şebeke gerilim seviyesinin değişimi koşullarında yapılan simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Referans güç değeri, elektrikli araçlar içerisinde bulunan batarya yönetim algoritması tarafından şarj ünitesine gönderilmektedir. Bu nedenle şarj cihazlarının farklı güç değerlerinde çalışma testlerinin yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, şebeke geriliminde belirli oranda farklılıklar oluşabilmesi de olası durumlar arasında yer almaktadır. Önerilen sistemin farklı gerilim seviyesinde testleri bu olası durumda çalışabilirliğini incelemek amacıyla

gerçekleştirilmiştir. Şekil 7(a)'da görüldüğü üzere, referans güç değeri ani olarak 5kW'tan 10kW'a yükseltilmiştir. Referans değişiminden şebeke geriliminin bir periyot süresi sonrasında güç seviyesinin 10kW'a ulaştığı görülmektedir. Batarya ve doğrultucu çıkış gerilimlerinin güç değişimi sonrasında yine aynı seviyede olduğu Şekil 7(b)'de görülmektedir. Güç seviyesinin artmasıyla batarya gerilimi üzerindeki düşük frekanslı dalgalanmalar da artmıştır. Güç referansının artırılmasıyla birlikte referans akım değerinin de Denklem 13'e göre arttığı Şekil 7(c)'de görülmektedir. Bununla birlikte, i_L akımının da kısa sürede (2ms) referansına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 7. Güç referansının 5kW'tan 10kW'a çıkarılması durumuna ait sonuçlar a) Şebekeden çekilen güç ve referansı b) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri c) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı d) Şebeke gerilimi (Results obtained increasing the reference power from 5kW to 10kW a) Reference and actual grid power b) Output voltage of the rectifier and battery c) Input and reference current of boost converter d) Grid current e) Grid voltage)

i_L akımının şebeke akımının alternanslara göre düzenlenmiş olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 7(d)'deki şebeke akımı sonuçları güç değişiminin hızlı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Bu durum, önerilen kontrol yönteminin dinamik cevabının herhangi bir aşım olmadan hızlı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ancak, Şekil 7(a)'da verilen dinamik tepki cevabının yaklaşık bir periyot sürdüğü görülmüştü. Akım sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, güç hesabında kullanılan dönüşümlerin hesaplamalarda yaklaşık bir periyotluk gecikmeye yol açtığı çıkarımına varılabilir.



Şekil 8. Şebeke gerilimindeki değişim altında elde edilen sonuçlar a) Şebeke gerilimi b) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri c) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı d) Şebeke akımı e) Şebekeden çekilen güç ve referansı (The results obtained under variation in grid voltage a) Grid voltage b) Output voltage of the rectifier and battery c) Input and reference current of boost converter d) Grid current e) Reference and actual grid power)

Ayrıca, şebeke akım ve gerilim sonuçları göz önünde bulundurulduğunda her iki sinyalin de aynı fazda olduğu Şekil 7(d) ve (e)'den görülmektedir.

Önerilen sistemin farklı şebeke gerilim genliğinde çalışabilme kabiliyetinin testi dinamik cevap açısından yapılan diğer bir simülasyon çalışmasıdır. İlgili teste ait simülasyon sonuçları Şekil 8'de görülmektedir. Önceki simülasyon çalışmalarından farklı olarak, simülasyon başlangıcında şebeke geriliminin etkin değerinin 250V olduğu Şekil 8(a)'da görülmektedir. Bu durumda, doğrultucu çıkış geriliminin şebekenin doğrultulmuş formu olduğu Şekil 8(b)'nin başlangıç bölümünde görülmektedir. Şebeke geriliminin önceki çalışmalardan yüksek olması ve güç değerinin sabit olması sebebiyle akım referansının tepe değerinin azaldığı (56.5A) Şekil 8(c)'de görülmektedir. Şebeke akım ve geriliminin bu çalışma koşulunda da aynı fazda olduğu Şekil 8(a) ve (d)'nin başlangıç bölümünde görülmektedir. Şebeke geriliminin etkin değeri 250V'tan 200V'a düşürüldüğü anda (0.045s), doğrultucu çıkış geriliminin de benzer şekilde aniden azaldığı Şekil 8(b)'de görülmektedir. Gerilim seviyesinin düşmesiyle, 10kW güç aktarımının sürdürülmesi için akım referansının 70.7A değerine yükseldiği Şekil 8(c)'de görülmektedir. Yaklaşık 2ms süre içerisinde i_L yeni referansını takip etmeye başlamıştır. Şekil 8(d)'de görüldüğü üzere, bu durum benzer olarak şebeke akımında da meydana gelmiştir. Şekil 8(e)'de verilen güç grafiğinden görüldüğü üzere, şebeke gerilimindeki değişimden önce ve sonrasında güç değeri referansını takip etmektedir. Dinamik

cevabının incelenmesi için yapılan bu simülasyon çalışmaları sonucunda, önerilen kontrol yapısının farklı güç ve gerilim seviyelerinde düzgün bir şekilde çalıştığı elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Tablo 2'de elektrikli araçların yerleşik şarj sistemlerinde kullanılan bir fazlı güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler için geliştirilmiş kontrol yöntemlerinin karşılaştırması verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türevsel (PID) denetleyiciler literatürde akım ve gerilim kontrolü için kullanılan yöntemler arasındadır [25]-[27]. [25] ve [26]'da iç-içe bağlı denetleyiciler kullanıldığından 4 adet ayarlanması gereken kontrol parametresi bulunurken, tek aşamalı PID kontrolcü bulunan [27]'de 3 parametrenin ayarlanması yeterli olmaktadır. Önerilen MÖK yönteminde ise sadece ağırlıklandırma faktörü kullanıldığından ayarlanması gereken bir parametre bulunmaktadır. Dolayısıyla, önerilen sistemin en az parametre ayarına ihtiyaç duyması kontrolcü tasarımı aşamasında kolaylık sağlayacak bir avantaj olarak vurgulanabilir. Çalışmaların güç kapasitesi açısından karşılaştırması yapıldığında, önerilen sistemin en yüksek nominal güç değerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, önerilen sistemin THB bozulma değeri [26]'daki sonuçlara yakın olmakla birlikte, [25] ve [27]'deki çalışmalara göre daha iyi olduğu Tablo 2'de görülmektedir. Önerilen sistemin verimi diğer çalışmalarla benzer seviyelerdedir.

Tablo 2. Bir fazlı güç faktörü düzeltmeli yükseltilen dönüştürücüler ve kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması (Comparison of single phase power factor correction boost converters and control methods)

	[25]	[26]	[27]	Önerilen Yöntem
Uygulama alanı	Elektrikli Araç Yerleşik Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Yerleşik Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Şarj Sistemi
Kontrol yöntemi	PI tabanlı akım-gerilim kontrolü	PI tabanlı ortalama akım kontrolü	PID tabanlı gerilim kontrolü	MÖK
Ayarlanması gereken kontrol parametresi sayısı	4	4	3	1
Nominal güç	3kW	1kW	3.2kW	10kW
THB	%4,1	%3,6	%3,95	%3,46
Verim (maksimum)	%96,4	%96	%95	%96,5

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrikli araçlar üzerine yerleşik olan güç elektroniği şarj bileşenlerini ortadan kaldırmak için yükseltilen dönüştürücü tabanlı güç

faktörü düzeltmeli ev tipi bir DA şarj ünitesi ve kontrolü önerilmiştir. Köprü tipi doğrultucu ve yükseltilen dönüştürücüden oluşan güç elektroniği yapısının kontrolü Model Öngörülü Yöntem ile sağlanmıştır. Önerilen sistemin performansı kararlı

ve geçici durumlar içeren simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin kararlı durumda akım kontrolünü ve güç faktörü düzeltme işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, batarya şarj işleminin ve güç kontrolünün gerçekleştirildiği simülasyon çalışmalarında görülmüştür. Önerilen kontrol yönteminin geçiş durumlarında da oldukça başarılı dinamik cevaplar sergilediği ve THB seviyesinin %3,46 olduğu görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Naki GÜLER: Önerilen yöntemin tasarımı ve simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He designed the proposed method and performed the simulation studies. He also analyzed the results and carried out writing the article.

Ugur FESLİ: Literatür araştırmasını yapmış, simülasyon çalışmalarının değerlendirilmesinde katkı sağlamıştır. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He contributed to literature research and evaluation of the simulation results. He also analyzed the results and carried out writing the article.

Samet BİRİCİK: Simülasyon çalışmaları ve teorik aşamalarda katkı sağlamıştır. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He contributed to simulation studies and theoretical parts. He also analyzed the results and carried out writing the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Koç, M., Tör, O. B., & Demirbaş, Ş., Analysis the Effects of Electric Vehicles on Distribution Networks with Simulations Based on

Probabilistic Methods. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(1), 95-107 (2021).

[2] Boyar, A., Kabalcı, Y., & Kabalcı, E., Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology1-1. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1475819> (2024).

[3] Yahaya, A. A., Edpuganti, A., Khadkikar, V., & Zeineldin, H., A Novel Simultaneous AC and DC Charging Scheme for Electric Vehicles. IEEE Transactions on Energy Conversion (2024).

[4] Kerem, A., & Gürbak, H., ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN HIZLI ŞARJ İSTASYONU TEKNOLOJİLERİ. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(3), 644-661 (2020).

[5] Blinov, A., Chub, A., Guler, N., Bayhan, S., Parsa, L., & Vinnikov, D., Modular MV Naturally Balanced Converter with High-Frequency Isolation and no DC-Link Capacitor for EV Fast Charging. IEEE Transactions on Transportation Electrification (2024).

[6] Komurcugil, H., Guler, N., Bayhan, S., & Gulbudak, O., Hysteresis Current Control of Buck-Boost Non-Isolated Onboard Charger for Electric Vehicles. In IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-6). IEEE (2023).

[7] Yasa, Y., A system efficiency improvement of DC fast-chargers in electric vehicle applications: Bypassing second-stage full-bridge DC-DC converter in high-voltage charging levels. Ain Shams Engineering Journal, 14(9), 102391 (2023).

[8] Safayatullah, M., Elrais, M. T., Ghosh, S., Rezaii, R., & Batarseh, I., A comprehensive review of power converter topologies and control methods for electric vehicle fast charging applications. IEEE Access, 10, 40753-40793 (2022).

[9] Guler, N., Bayhan, S., Fesli, U., Blinov, A., & Vinnikov, D., Super-twisting Sliding Mode Control Strategy for Input Series Output Parallel Converters. IEEE Access (2023).

[10] Safayatullah, M., Rezaii, R., Ghosh, S., & Batarseh, I., Control of Electric Vehicle Fast Charger based on Vienna Rectifier and Dual Active Bridge DC-DC Converter. In 2022 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (pp. 1-6). IEEE (2022)

[11] Pradhan, R., Shah, S. B., Hassan, M. I., Wang, Z., & Emadi, A., A 15 kW Wide-Input Reconfigurable Three-Level DAB Converter

- for On-Board Charging of 1.25 kV Electric Vehicle Powertrains. IEEE Transactions on Transportation Electrification (2024).
- [12] SAE International, "SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler," 2011 [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201210/
- [13] ARAI, "Electric Vehicle Conductive AC Charging System," 2017
- [14] Ali, T. F., Dominic, D. A., Prabhakaran, P., & Parameswaran, A. P., A Bidirectional Interleaved Totem Pole PFC-based Integrated On-board Charger for EV SRM Drive. IEEE Access (2024).
- [15] Kumar, G., & Singh, B., A Single-Stage Bridgeless PFC Charger with Enhanced Power Quality for LEV Mounted Solar PV Panel. IEEE Transactions on Transportation Electrification (2024).
- [16] Karneddi, H., Ronanki, D., & Rodriguez, J., Universal Integrated Onboard Charger with Model Predictive Current Control for Plug-in EV Charging. IEEE Transactions on Power Electronics (2024).
- [17] Kumar, G. N., Verma, A. K., & Mathuria, K., A novel buck-boost derived pfc converter for ev charging. In IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-6). IEEE (2022).
- [18] Podamekala, V. K., & Sandeep, V., An Isolation Circuit based Charging and Discharging Model of On-Board Charger in Electric Vehicle. In 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT) (pp. 1-6). IEEE (2022).
- [19] Güler, N., 9-Seviyeli Paket E-Hücreli Eviriciler için Üstün Burulma Algoritması Tabanlı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(1), 57-70 (2021).
- [20] Güler, N., Biricik, S., Bayhan, S., & Komurcugil, H., Model predictive control of DC-DC SEPIC converters with autotuning weighting factor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(10), 9433-9443 (2020).
- [21] Güler, N., & Komurcugil, H., Energy function based finite control set predictive control strategy for single-phase split source inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(6), 5669-5679 (2021).
- [22] Campos-Salazar, J. M., Viani-Abad, A., Sandoval-García, R., Modeling and Simulation of a Single-Phase Linear Multi-Winding Transformer in the D-Q Frame. J. Electron. Electric. Eng., 3, 224–253 (2024).
- [23] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), (2014).
- [24] Honadia, P. A. A., Barro, F. I., Sane, M., Performance Analysis of a Boost Converter with Components Losses. Energy and Power Engineering, 10, 399-413 (2018).
- [25] Zinchenko, D., Blinov, A., Chub, A., Vinnikov, D., Verbytskyi, I., Bayhan, S. High-Efficiency Single-Stage On-Board Charger for Electrical Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70(12), 12581-12592, (2021).
- [26] A. V. J. S. Praneeth and S. S. Williamson, Modeling, Design, Analysis, and Control of a Nonisolated Universal On-Board Battery Charger for Electric Transportation, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 5(4), 912-924, (2019).
- [27] Chen, Y., Zhou, J., Dai, W. P., & Hu, E., Application of Improved Bridgeless Power Factor Correction Based on One-cycle Control in Electric Vehicle Charging System. Electric Power Components and Systems, 42(2), 112–123, (2014).