

Tek Fazlı Birim Güç Faktör Doğrultucunun Doğrusal Olmayan Denetimi: Doğrudan Olmayan Geri-Adımlamalı Yaklaşım

Nonlinear Control of Single Phase Unity Power Factor Rectifier: An Indirect Back-stepping Approach

Murat Şeker

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Gebze Teknik Üniversitesi
seker@gtu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, tek fazlı birim güç faktör doğrultucunun denetimi için doğrusal olmayan denetim yöntemi önerildi. Önerilen geri adımlamalı denetim yaklaşımı metodu dolaylı ayarlama olarak çıkış geriliminin istenen değere ayarlanması için gerekli uygun akımın ayarlanması için kullanılır. Lyapunov kararlılık analizi sistem durumlarının kararlılığı ve kapalı çevrim sinyallerinin sınırlılığının kanıtlanması için kullanıldı. Benzetim sonuçları önerilen metodun etkinliğinin gösterilmesi için sunuldu.

Abstract

In this paper, it is proposed that a nonlinear control methodology for the control of a single phase unity power factor rectifier. The suggested method, a back-stepping control approach, utilizes to regulate the corresponding current required to set the output voltage to its desired value as opposed to directly regulating the output voltage. Lyapunov stability analysis is used to prove the stability of system states and boundedness of closed loop signals. Simulation results are presented to illustrate the effectiveness of the proposed method.

1. Giriş

Genel olarak elektrik mühendisliği bakış açısıyla güç faktörü, bir elektrik sisteminde gerçek gücün, görünür güce oranı olarak tanımlanır. Diğer bir yönden; akım ve gerilim dalga şekilleri arasındaki açının kosinüsüdür. Güç elektroniği anahtarlama devrelerinde ise ana bileşen dışında, harmonik ilave etmesi nedeni ile akım ile gerilim ana bileşenleri arasındaki açının kosinüsüne yer değiştirme faktörü olarak tanımlanmaktadır. Güç faktörü düzeltilmesinin amacı ise, giriş akım distorsiyonunu minimize etmek ve akım ile gerilimi aynı fazda tutmaya çalışmaktır. Burada şunu belirtmek gerekir ki, eğer güç faktörü 1 değil ise akım, gerilim ile aynı fazda ve dalga şeklini takip edemez. Anahtarlama güç elektroniği devrelerinde, dalga şekilleri ana bileşenin yanı sıra harmonikleri de içerdiğinden güç kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca dalga şekli sinüzoidal olmayan akımlar, gerilim dalga şekline etki ederek gerilimin sinüzoidal şeklini bozarak ve böylece gerilim kaynağına bağlanacak diğer cihazlar için sorun yaratabilir. Düşük güç faktörü ile ilgili olan

yüksek giriş akımları ve özellikle yüksek bozulmadan ve yüksek frekanslı harmoniklerden dolayı oluşacak sorunları elemine edecek filtrelerinin tasarımı çok zor ve pahalıdır [1].

Güç elektroniğinde sıklıkla kullanılan çeviricilerde, tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu devreleri anahtarlama güç elektroniği devrelerinin özel bir sınıfını oluşturmaktadır. Bu devreler genel olarak görevleri, giriş AC kaynak gerilimini çıkışta istenilen değerde ki DC gerilime dönüştürmektedir. Bu görevi yaparken; giriş akımı denetleyerek birim güç faktörü değerine yakın bir değerde ve giriş gerilimi ile aynı fazda sinüs dalga şeklini sağlamaktır [1]. Çeşitli topolojiler ile birim güç faktörünün düzeltilmesi sağlanmasına rağmen, genel olarak tek fazlı yükseltilen güç faktörü düzeltici olarak bilinen topoloji kullanılır [2].

Anahtarlama DC güç çeviricileri birçok elektronik sistemde yaygın olarak kullanılması bu çeviricilerin yapısının elektronik sistem tasarım mühendisleri tarafından anlaşılmasını gerekli kılmıştır. Anahtarlama çeviriciler doğrusal olmayan, zamanla değişen sistemler olduğundan yüksek performanslı denetim tekniklerine gereksinim duymaktadır. Bu kontrol sistemlerinin her türlü çalışma şartlarında dayanıklı olması, giriş ve yükteki değişimleri bastırarak iyi bir dinamik cevap vermesi istenmektedir[3]. Bilimsel ortamlarda tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu devresinin denetimi ve birim güç faktörünün düzeltilmesini amaçlayan birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan [4] de, adı geçen sistem ele alınarak doğrusal olmayan Lyapunov tabanlı denetim yöntemi uygulanarak, Lyapunov kararlılık ölçütleri kullanılarak asimptotik kararlılık elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada yük tahmin hatasının üstel olarak sifıra yakınsaması sağlanmıştır. Diğer bir çalışma [5] de ise, tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu devresinin geliştirilmiş modeli için ortalama dinamik denklemleri elde edildi ve uyarlamalı denetim algoritması kullanılarak denetleyici tasarımı yapıldı. Deneysel sonuçlar ile doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin, doğrusal yöntemlere göre daha hızlı ve daha iyi sonuçlar verdiğini belirttiler. [6] çalışmasında ise yazarlar, doğrusal olmayan denetim yöntemlerinden uyarlamalı denetimi kullanarak toplam harmonik distorsiyonunun azalmasını sağlayıp, aynı zamanda da birim güç faktörünün düzeltilmesini deneysel sonuçlar ile desteklediler. Sürekli iletim modunda çalışan tek fazlı güç

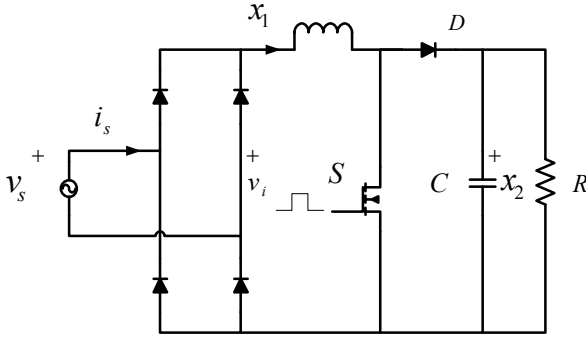
faktörü düzeltme devreleri için sabit anahtarlama frekanslı darbe genlik modülasyon denetimi [7] çalışmasında sunuldu. Tek fazlı yüksek güç faktörünün elde edilmesi için, akım kipli denetim yöntemi kullanılarak genel bir denetim stratejisi [8] çalışmasında açıklandı. Birim güç faktörünün düzeltilmesini amaçlayan diğer bir çalışmada [9], doğrultucunu performansı yük direnci uyarlaması yapan pasif tabanlı denetleyici kullanılarak artırıldı.

Geri adımlamalı denetim yöntemi; doğrusal olmayan sistemlerde yinelenmeli ve sistematik denetim yöntemlerindendir. Bu denetim yönteminde ki yaklaşım; doğrusal olmayan sistemler için buna uygun geri beslemeli denetleyici tasarımı için gerekli aşamaları sistematik temelli olarak sunmasıdır [10].

Bu çalışmada; doğrusal olmayan denetim yöntemini tek fazlı birim güç faktörü doğrultucusuna uygulandı. Önerilen yöntem geri adımlamalı yaklaşım ile istenen çıkış gerilimi uygun referans akım kullanılarak dolaylı olarak ayarlanmıştır. Sistem kararlılığı ve kapalı çevrim sinyallerin sınırlılığını kanıtlamak için Lyapunov ölçütleri kullanıldı. Önerilen denetim yönteminin etkinliğini göstermek için benzetim sonuçları sunuldu.

Çalışmanın geri kalanı belirtildiği gibi organize edilmiştir. Bölüm 2’de üzerinde düşünülen sistem için kontrol problemi ve tek fazlı dinamik denklemleri sunulmaktadır. Bölüm 3’te hata sistemi geliştirme ortaya konulmuş ve denetleyici tasarımı ve kararlılık analizi sunulmuştur. Bölüm 4’de benzetim sonuçları sunulmuştur. Bölüm 5’de ise sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

2. Tek Fazlı Güç Faktör Doğrultucu Modeli



Şekil 1: Tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu.

Çalışmamıza konu olan, tek fazlı güç faktörü doğrultucu devresi Şekil 1’de tanıtıldı. Bu devrede görüleceği üzere, doğrultucu devresinin çıkışında DA yükselten tip çevirici yer almaktadır. Denetim anahtarı S; ayarlanmış anahtarlama frekansına göre iletme ve kesime geçmektedir. Böylece devrede ki bobin akımı asla sıfır olmadığı farz edilmektedir. Bu devrenin çıkışında yer alan yük gerilimi; giriş geriliminin tepe değerinden daha yüksek değerlidir. Bu doğrultucunun dinamik denklemleri;

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}\mu x_2 + \frac{1}{L}v_i \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{C}\theta x_2 \quad (2)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Bu ifadelerde yer alan; $x_1(t)$ bobin akımını, $x_2(t)$ ise çıkış gerilimini ve $v_i(t) = E|\sin\omega t|$ olmak üzere doğrultucu köprü çıkışı gerilim değerini göstermektedir. Bu arada; $\theta = \frac{1}{R} \in \mathbb{R}$ olmak üzere yük direnci iletkenliği ifade etmektedir. Bu ifadelerde yer alan denetim sinyaliniz $\mu(t) \in \mathbb{R}$ çeviricinin çalışma oranı fonksiyonudur.

3. Denetleyici Tasarımı

Bu çalışmadaki denetim amaçlarımız; istenen çıkış gerilim değeri, x_{2d} nin dolaylı denetim yaklaşımı kullanılarak elde edilmesidir. Matematiksel olarak bu amacı gerçeklemek için istenen akım değeri $x_{1d}(t) \in \mathbb{R}$ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$x_{1d} = 2\frac{x_{2d}^2\theta}{E}|\sin\omega t| \quad (3)$$

Bu ifadede $|\sin\omega t|$ terimi istenen güç faktörü tarafından harekete geçirmek amacıyla yer almaktadır. Denetim amacımızın ölçülmesi için, çıkış gerilimi hatası $e_o(t) \in \mathbb{R}$ ve bobin akımı hatası $e_i(t) \in \mathbb{R}$ tanımlandı. Bu hata tanımları;

$$e_i = x_1 - x_{1d} \quad (4)$$

$$e_o = x_2 - x_{2d} \quad (5)$$

burada yer alan $x_{2d}(t)$; istenen çıkış gerilim değeri ve $x_{1d}(t)$ ise daha önce tanımlandığı üzere istenen bobin akımı değeridir. (4) ifadesinin zamana göre türevi alınıp ve daha sonra (1) ifadesi kullanılarak;

$$\dot{e}_i = -\frac{1}{L}\mu x_2 + \frac{1}{L}v_i - \dot{x}_{1d} \quad (6)$$

elde edilir. Bu ifadeye; $\alpha(t)$ yardımcı denetim sinyali olarak daha sonra tanımlanacaktır, $\mu\alpha$ terimini ekleyip çıkarmak suretiyle;

$$\dot{e}_i = \mu\eta + \frac{1}{L}v_i - \dot{x}_{1d} - \mu\alpha \quad (7)$$

ifadesi elde edilir. Burada yer alan $\eta(t)$;

$$\eta \triangleq \alpha - \frac{1}{L}x_2 \quad (8)$$

olarak tasarlandı. Yardımcı denetim sinyaliniz $\alpha(t)$ ise aşağıdaki gibi tasarlandı;

$$\alpha \triangleq \frac{1}{\mu}\left\{k_i e_i + \frac{1}{L}v_i - \dot{x}_{1d}\right\} \quad (9)$$

Bu ifade de yer alan $k_i \in \mathbb{R}$; denetim kazancı olarak tanımlandı. (4) ifadesiyle tanımlanan bobin akımı hatasının kapalı çevrim hata dinamiği;

$$\dot{e}_i = -k_i e_i + \mu\eta \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Geri adımlamalı denetim metodu kullanılarak yapılan tasarımlarda, yardımcı denetim sinyaliniz $\eta(t)$ içinde hata dinamiğini elde etmemiz gerekmektedir. Bu amacı gerçekleştirmek için; (9) ifadesinin zamana göre türevini alındıktan sonra (8) ifadesinin zamana göre türevinde yerine yazdığımızda,

$$\dot{\eta} = -k_i \frac{1}{L} x_2 + \frac{1}{\mu} \left\{ k_i \frac{1}{L} v_i - k_i \dot{x}_{1d} - \ddot{x}_{1d} + \frac{1}{L} \dot{v}_i \right\} - \frac{\dot{\mu}}{\mu} \alpha - \frac{1}{L} \mu x_1 + \frac{1}{L} \theta x_2 \quad (11)$$

elde edilir. Bu açık çevrim dinamik denklemden faydalananak $\mu(t)$ denetim sinyalinizin türevi;

$$\dot{\mu} \triangleq \frac{\mu}{\alpha} \left\{ k_\eta \eta + \mu e_i - k_i \frac{1}{L} x_2 + \frac{1}{\mu} \left\{ k_i \frac{1}{L} v_i - k_i \dot{x}_{1d} - \ddot{x}_{1d} + \frac{1}{L} \dot{v}_i \right\} - \frac{1}{L} \mu x_1 + \frac{1}{L} \theta x_2 \right\} \quad (12)$$

şeklinde tasarlandı. Bu ifadede yer alan $k_\eta \in \mathbb{R}$ denetim kazancımızdır. Yardımcı denetim sinyali $\eta(t)$ nin kapalı çevrim dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{\eta} \triangleq -k_\eta \eta - \mu e_i \quad (13)$$

Artık kararlılık analizini yapmak için aşağıdaki teoremi sunabiliriz.

Teorem 1: Doğrusal olmayan denetleyicimiz; (12) ifadesi ile yardımcı denetim sinyaliniz (9) ifadesi elde edildi. Bu iki ifade, (4) ifadesi ile tanımlanan akım hatası ifadesini desteklemektedir. $e_i(t)$ ve $\eta(t)$ sınırlı bir zarf içerisinde üstel olarak sifıra yakınsamasını sağlar. Böylece dolaylı olarak çıkış gerilim değeri istenen gerilim değerine ayarlanır.

Kanıt 1: Bu teoremi kanıtlamak için aşağıda (14) ifadesindeki pozitif tanımlı fonksiyonu ele alalım:

$$V \triangleq \frac{1}{2} e_i^2 + \frac{1}{2} \eta^2 \quad (14)$$

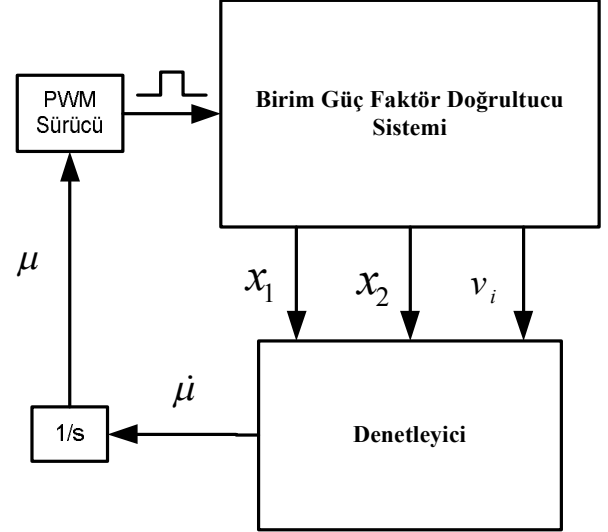
Bu ifadenin zamana göre türevi alınıp, (10) ve (13) ifadeleri kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\dot{V} \triangleq -k_i e_i^2 - k_\eta \eta^2 \quad (15)$$

(14) ve (15) ifadelerinden, Lyapunov argümanlarını kullanarak $e_i(t)$, $\eta(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olmak üzere sınırlı sinyaller olduklarını gösterebiliriz. Standart sinyal izleme argümanları ile tüm sinyallerin kapalı çevrim hata sistemlerinin sınırlı kaldıkları sonucuna varabiliriz. Ayrıca (14) ve (15) ifadelerinden; $e_i(t)$, $\eta(t)$ sinyallerinin üstel olarak sifıra yakınsadıklarını sonucuna ulaşmamızı sağlar. Böylece akım hatası kullanarak çıkış gerilimizi istenen değere ayarlanması sağlanmış olur.

4. Benzetim Çalışması

Şekil 1’de verilen sistemimiz için (12) ve (9) ifadeleriyle tasarlanan denetleyicimiz MATLAB-Simulink ortamında benzetim çalışması yapıldı. Bu çalışmada sistem giriş gerilimi; $v_s = 220 \sin \omega t$ V ve istenen çıkış gerilimi $x_{2d} = 300$ V olarak ayarlandı. Bunların dışındaki diğer parametrelerimiz ise sistem frekansı $f = 50$ Hz, $L = 1.54$ mH, $C = 760$ μ F, $\theta = 6.6$ mS ve anahtarlama frekansı da $f_s = 100$ kHz olarak seçildi.

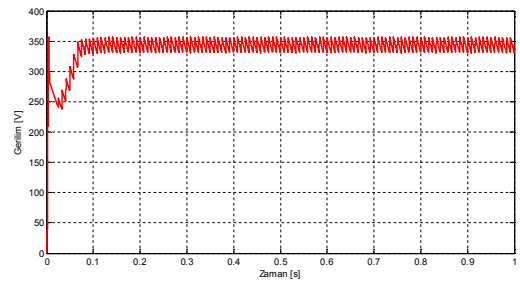


Şekil 2: Tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu denetleyici uygulama blok şeması.

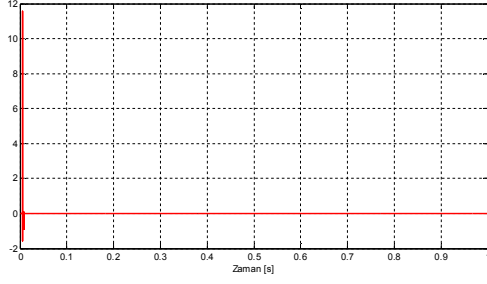
Şekil 2’de verilen denetleyici uygulama blok diyagramında gösterildiği gibi çıkış gerilimi dolaylı olarak ayarlandı. Geri adımlamalı denetleyicimiz çıkışından $\dot{\mu}(t)$ fonksiyonu elde edilmektedir. Bu fonksiyonun zamana bağlı olarak integrali alınarak $\mu(t)$ fonksiyonu elde edildi. Bu benzetim çalışmasında, $x_{2d} = 350$ V için denetim parametrelerimiz;

$$k_i = 14, k_\eta = 0.4 \quad (16)$$

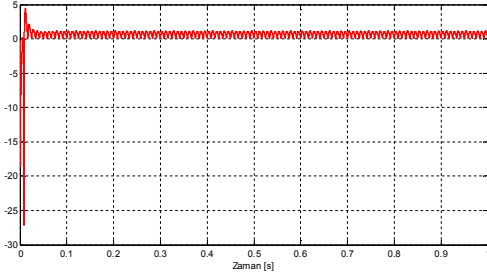
olarak seçilmiştir. Tek fazlı birim güç faktörü doğrultucu devresinin çıkış gerilim grafiği Şekil 3’de verilmiştir. Denetleyici tasarımında kullandığımız $\eta(t)$ yardımcı denetim sinyalinizin hata grafiği Şekil 4’de verilmiştir. Son olarak denetim sinyaliniz $\mu(t)$ nin grafiği Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 3: Sistem çıkış gerilimi.



Şekil 4: Yardımcı denetim hata sinyali.



Şekil 5: Denetim sinyali.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada; doğrusal olmayan denetleyici, tek fazlı doğrultucunun özel bir tipi olan tek fazlı güç doğrultucu için tasarlandı. Denetleyici tasarımı dolaylı olarak yani; akım hatası kullanılarak çıkış geriliminin istenen değerine ayarlandı. Önerilen geri adımlı temelli denetleyicimizin akım ve gerilim hatalarının sıfıra üstel olarak yakınsamasını sağlandı. Benzetim sonuçları ile önerilen denetleyici tasarım yöntemimizin etkinliği ve dayanıklılığı gösterildi.

Kaynakça

- [1] Göktaş, T. ve Murat, E., “Yüksek Güçlü, Birim Güç Faktörlü Yükseltici Tip Konvertörün Kayma Mod Kontrolü”, *TMMOB Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 173-177.
- [2] Rao, V.M. Jain, A.K. Reddy, K.K. ve Behal, A., “Nonlinear Control of a Single Phase Unity Power Factor Rectifier: Design, Analysis, and Experimental Result”, *IEEE Transactions on Control System Technology*, Cilt:16, No: 6, 1301-1307, 2008.
- [3] Seker M. ve Zergeroglu E., “Nonlinear Control of Flyback type DC to DC Converters: An IndirectBackstepping Approach”, *IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2011, 65-69.
- [4] Jain, A. K. Behal, A. ve Mohan, N., “Nonlinear controller for a single phase one quadrant unity power factor rectifier”, *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003, 3876-3881.
- [5] Rao, V. M. Reddy, K. K. Behal, A. ve Jain A. K., “Modeling, Control, and Experimental Results for a Single Phase One Quadrant Unity Power Factor Rectifier”, *The 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 2006, 6223-6228.
- [6] Rao, V. M. Sadagopan, R. Jain, A. K. ve Behal A., “Digital implementation of a nonlinear controller for a unity power factor rectifier: simulation and experiments”, *American Control Conference*, 2006, 3457-3462.
- [7] Lai, Z. ve Smedley, K. M., “A family of power-factor-correction controllers”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1997, 66-73.
- [8] Rajagopalan, J. Lee, F.C. ve Nora P., “A generalized technique for derivation of average current mode control laws for power factor correction without input voltage sensing”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1997, 81-87.
- [9] Escobar, G. Chevreau, D. Ortega, R. ve Mendes, E., “An adaptive passivity-based controller for a unity power factor rectifier”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Cilt: 9, No: 4, 637-644, 2001.
- [10] Şeker M. ve Zergeroğlu E., “Çapraz Tip DA Çevirici için Geri Adımlı Denetim Tekniği Sonrası Kayan Kipli Denetim Tasarımı”, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı-TOK*, 2013, 343-347.