

Güç Elektroniği Dönüştürücüleri için Adaptif Histerezis Akım Kontrol Yönteminin İyileştirilmesi

Improvement of Adaptive Hysteresis Current Control Method for Power Electronics Converters

A. Faruk BAKAN, A. Talha DUDAK

Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi
fbakan@yildiz.edu.tr, talhad@yildiz.edu.tr

Özet

Histerezis akım kontrol yöntemi, güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan analog temelli eski bir yöntemdir. Diğer akım kontrol yöntemlerine göre daha yüksek bir dinamik cevap ve kararlılık sağlamasına rağmen mikroişlemcilerin gelişmesi ile kullanımı azalmıştır. Bunun en temel nedeni anahtarlama frekansının değişken olmasıdır. Zira değişken anahtarlama frekansı bazı uygulamalarda çözümü zor sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle frekansın sabit tutulması amacıyla histerezis bantın hesap yoluyla adaptif olarak kontrol edildiği bir yöntem önerilmiştir. Böylece sabit frekanslı ve hızlı dinamik cevaba sahip bir akım kontrol yöntemi hedeflenmektedir. Bu yöntem sayesinde sistemin kararlı çalışmasının sağlanması ve dinamik cevabının iyileştirilmesi için detaylı kontrol analizlerinin yapılmasına gerek kalmamaktadır. Geliştirilen sayısal akım kontrol yöntemi ile analog yöntemin problemleri ortadan kaldırılarak frekansın sabit tutulması sağlanmıştır. Önerilen yöntem iki seviyeli yarım köprü invertere uygulanmıştır. Sonuçlar klasik analog histerezis akım kontrol yöntemi ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Histerezis akım kontrolü, sabit frekans, gerilim kaynaklı inverter

Abstract

The hysteresis current control method is an old analog-based method used in power electronic converters. Despite a higher dynamic response and stability compared to other current control methods, the use of this method has been reduced with the development of microprocessors. The most basic reason for this is that the switching frequency is variable. Because the variable switching frequency leads to difficult problems in some applications. Thus, a method is proposed that is controlled the hysteresis band as adaptive through calculation to keep fixed the switching frequency. Therefore, it is aimed that a current control method has fixed frequency and faster dynamic response. Thanks to this method, detailed control analysis is not necessary to ensure stable operation and to improve dynamic response.

*Bu çalışma 115E951 nolu proje kapsamında TÜBİTAK ve 2012-04-02-KAP07 nolu proje kapsamında YTÜ BAP tarafından desteklenmiştir.

With the developed digital current control method, the problem of the analogue method is removed and the frequency is kept constant. Proposed method is applied to two level half bridge inverter. The results is offered comparatively with conventional analog hysteresis current control.

Keywords: Hysteresis current control, fixed frequency, voltage source inverter

1. Giriş

Histerezis akım kontrol yöntemi doğrusal olmayan bir akım kontrol yöntemidir. Bu kontrol yöntemi, hızlı dinamik cevabı ve uygulama basitliği nedeniyle tercih edilmektedir. Klasik histerezis kontrolde sabit bir histerezis bant kullanılarak, ölçülen akım ile referans akımın karşılaştırılmasına bağlı olarak anahtarlama kararı verilmektedir. Değişken anahtarlama frekansı, değişken gürültü seviyesi ve sayısal olarak gerçekleştirme zorluğu histerezis akım kontrolünün dezavantajları olarak göze çarpmaktadır.

Histerezis akım kontrolünün analog olarak gerçekleştirilmesi oldukça kolaydır. Fakat sayısal gerçekleştirilmesi durumunda sürekli karşılaştırma ihtiyacından dolayı işlemcinin yükü artmakta ve gürültü problemleri nedeniyle uygulamada sorun oluşmaktadır. Histerezis akım kontrol yönteminin analog olarak gerçekleştirilmesi değişken anahtarlama frekansına sebep olduğundan uygulamalarda tercih edilmesini zorlaştırmaktadır.

Literatürde histerezis kontrol konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. [1],[2]'de ayarlanabilir bantlı histerezis kontrol için ortalama anahtarlama gerilim değeri kullanılmıştır. Yüksek zıt-emk değerinin, bir anahtarlama ortalaması gerilim değerine yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilmiş ve bu gerilim değeri DSP'nin timer birimi kullanılarak elde edilmiştir. Frekans yaklaşık olarak sabit tutulmuştur. [3]'te sabit frekanslı histerezis akım kontrol yöntemi için dead-beat prensibine dayalı bir yöntem önerilmiştir. Frekansın sabit tutulabilmesi için bant her anahtarlama sonrasında değiştirilmektedir. Böylece frekansın sabit tutulmasına çalışılmaktadır. Bununla birlikte deneysel sonuçlar frekansın sabit tutulamadığını göstermektedir. [4]'te sabit anahtarlama frekansı için bir önceki akım hatasının sıfır geçiş zamanını kullanarak alt ve üst bant genişliğini ayarlayan yeni kontrol yöntemi kullanılmıştır.

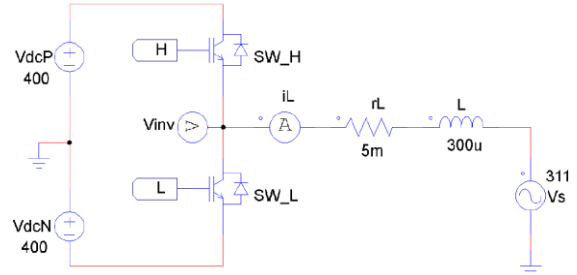
Yöntemin uygulanması FPGA ile gerçekleştirilmiştir. Yöntem mutlak akım hatası eğiminin işareti ile hesaplanan üst ve alt bantları durum makinasına vermekte sonrasında lojik bir devre yardımıyla anahtarlarma sinyalleri üretilmektedir. Anahtarlarma frekansı geçiş anlarında sabit tutulamamıştır. [5]'te verilen yöntemde oldukça karmaşık bir donanım kullanılmıştır. Yöntem parametrelere bağımlıdır. Hesaplama analog bir devre yardımıyla yapılmaktadır. Çok sayıda komponent kullanılması maliyeti artırmakta, gerçekleştirme zorluğu oluşturmakta ve güvenilirliği azaltmaktadır. [6]'da bir saat sinyali ile senkronize olan sabit frekanslı ve hatayı minimize eden, yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem üç fazlı sistemler için geliştirilmiş ve motor kontrolüne uygulanmıştır. [7]'de başlangıçta belirlenen bir band ile çalışma başlatılmaktadır. Anahtarlama periyodu tamamlandığında periyot ölçümü yapılmakta, yeni band, eski band değeri ile eski anahtarlama periyodu ve referans periyodu kullanılarak güncellenmektedir. Bant sürekli güncellenerek kararlı rejimde anahtarlama frekansının sabit tutulması hedeflenmektedir. Geçici rejimde ve hızlı değişen akım referanslarında yöntemin başarısı yeterli değildir. Bir anahtarlama sonrasında sistemin doğru değeri bulacağı öngörülmüştür. Fakat bu durum bazı şartlarda gerçekleşmemekte ve doğru bandın bulunması uzun sürebilmektedir. [8]'de sabit anahtarlama frekansını elde etmek için PLL kontrolüne, histerezis bandın basit ve kendi kendini ayarlayan analog tahmini eklenmiştir. Hem feedback hem de feedforward kontrol yöntemleri kullanılarak bu işlem gerçekleştirilmiştir. Parametre değişimlerine karşı kendi kendini ayarlama özelliği vardır. [9]-[11] çalışmalarında üç fazlı sistemler için geliştirilen histerezis akım kontrol yönteminde PLL kontrolü ile bant genişliği ayarlanmaktadır. [12]'de sadece iki faz akımının ölçülmesini gerektiren, üç fazlı VSI için geliştirilmiş sabit histerezis akımı denetleyicisi sunulmaktadır. VSI anahtarlama frekansını azaltmak için akım hatasının türev işareti ve gerilim vektörlerinin bilinmesini gerektirir. [13]-[16] çalışmalarında önerilen yöntemler parametrelere bağımlıdır. [17]'de histerezis akım kontrolü için analitik bir yaklaşım sunulmuştur. Programlanmış rampa karşılaştırıcı ile anahtarlama frekansı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Önerilen kontrolörün avantajı, taşıyıcı dalga biçiminin uygun genlik ve eğiminin önceden bilinmesidir. Geri beslemede oransal-integral (PI) denetleyici ve histerezis sınırlandırıcıya gerek yoktur. Bu işlemler için sistem parametreleri kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı tam olarak sabit tutulamamıştır.

Bu çalışmada güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan akım kontrol yöntemlerine alternatif olarak özgün bir kontrol yöntemi ve dijital bir kontrol devresi geliştirilmiştir. Yöntemin temel fikri histerezis temeline dayanması ve sabit frekansta çalışabilmesidir. Bandın değiştirilmesi ile frekansın sabit tutulması sağlanmıştır. Anahtarlama frekansı ölçülerek histerezis bandı uyarlamalı olarak kontrol edilmiştir. Geliştirilen yöntem güç elektroniği uygulamalarında akım kontrol performansını artırmakta ve sabit frekanslı PWM yöntemlerine alternatif olabilmektedir.

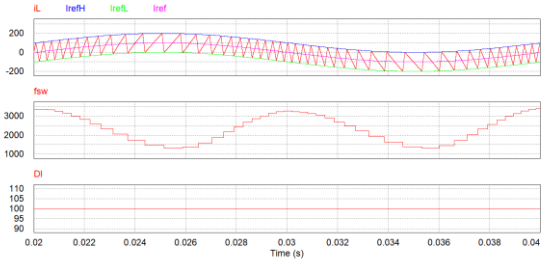
2. Adaptif Histerezis Akım Kontrol Yöntemi

Çalışmada geliştirilen yöntem Şekil 1'de gösterilen şebekeye enerji aktaran inverter devresi üzerinde açıklanmıştır. Histerezis kontrol yönteminde üst ve alt anahtarların sürme sinyalleri kontrol edilerek i_L endüktans akımının istenilen referansı takip etmesi hedeflenmektedir. Şebekeye enerji

aktaran inverterlerde akım formu şebeke ile aynı fazda olan sinüzoidal bir işarettir. Aktif filtre ve UPS uygulamalarında ise akım sinüzoidal formdan farklı olabilmektedir. Histerezis akım kontrol yönteminde sabit bir band için anahtarlama frekansını geniş bir aralıkta değiştirmektedir. Frekansın değişmesi şebeke gerilimi, dc bara gerilimi, endüktans değerlerine doğrudan bağlıdır. Histerezis akım kontrol yönteminde sabit akım bandının (DI) kullanılması durumunda oluşan değişken anahtarlama frekansı problemi Şekil 2'de gösterilmiştir. Simülasyon PSIM programı ile yapılmış, örnekleme zamanı $\Delta t = 200ns$ ve $I_{ref} = 100\sin(2\pi 50t)$ seçilmiştir.



Şekil 1. İki seviyeli tek fazlı gerilim kaynaklı inverter.



Şekil 2. Histerezis akım kontrol yönteminde sabit bantta ortaya çıkan değişken anahtarlama frekansı problemi. $DI=100A$, $I_{refm}=100A$

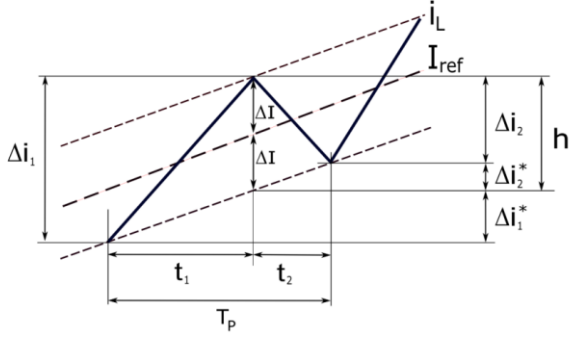
DC bara gerilimi 800V, $V_{dcP}=V_{dcN}=400V$ alınmıştır. 100A sabit bant uygulandığında anahtarlama frekansı 1100-3400 Hz arasında değişmektedir. Frekansın çok geniş bir aralıkta değişmesinin nedeni akımın yükselme ve düşme sürelerinin her anahtarlama periyodunda değişmesidir. Sabit histerezis band için anahtarlama frekansı değişken olmaktadır.

Klasik histerezis kontrolündeki değişken frekans probleminin çözümü için bandın kontrol edilmesi gerekmektedir. Anahtarlama frekansının sabit olabilmesi için bandın nasıl kontrol edilmesi gerektiği Şekil 3 üzerinde açıklanmıştır.

Şekil 3'te gösterilen tanımlar kullanılarak anahtarlama frekansının sabit olmasını sağlayan bant değeri matematiksel olarak elde edilmiştir. Bant hesabında kullanılan değişkenler aşağıda listelenmiştir.

- T_p : anahtarlama periyodu
- t_1 : üst anahtarın iletim süresi
- t_2 : üst anahtarın kesim süresi / alt anahtarın iletim süresi
- Δi_1 : t_1 süresi içinde endüktans akımdaki artış
- Δi_2 : t_2 süresi içinde endüktans akımdaki azalma

$\frac{di^*}{dt}$: akım referansının türevi
 Δi_1^* : t_1 süresi içinde akım referansındaki artış
 Δi_2^* : t_2 süresi içinde akım referansındaki artış
 ΔI : Histerezis bandı
 h : Akımdaki dalgalanma miktarı
 m_1 : t_1 süresi içinde endüktans akımının eğimi
 m_2 : t_2 süresi içinde endüktans akımının eğiminin mutlak değeri
 m_{ref} : akım referansının eğimi



Şekil 3. Sabit frekanslı histerezis akım kontrolü için değişken tanımları.

Sabit bir periyot/frekans için h değerinin bulunması için $T_p = t_1 + t_2$ eşitliğinde t_1 ve t_2 süreleri m_1 , m_2 ve m_{ref} eğimleri ile devre parametreleri cinsinden yazılabilir. t_1 aralığında endüktans akımındaki artış miktarı

$$\Delta i_1 = h + \Delta i_1^* \quad (1)$$

$$\Delta i_1 = \frac{di_L}{dt} t_1 = m_1 t_1 \quad (2)$$

$$m_1 = \frac{V_L(t_1)}{L} = \frac{V_{dcP} - V_s}{L} \quad (3)$$

elde edilir. t_1 aralığında akım referansının değişim miktarı

$$\Delta i_1^* = \frac{di^*}{dt} t_1 = m_{ref} t_1 \quad (4)$$

bulunur. (1) ve (4) kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$m_1 t_1 = h + m_{ref} t_1 \quad (5)$$

$$t_1 = \frac{h}{m_1 - m_{ref}} \quad (6)$$

t_2 'nin elde edilmesi için de benzer yol izlenir.

$$h = \Delta i_2 + \Delta i_2^* \quad (7)$$

$$\Delta i_2 = \frac{di_L}{dt} t_2 = m_2 t_2 \quad (8)$$

$$m_2 = -\frac{V_L(t_2)}{L} = \frac{V_{dcN} + V_s}{L} \quad (9)$$

elde edilir. t_2 aralığında akım referansının değişim miktarı aşağıdaki gibidir.

$$\Delta i_2^* = \frac{di^*}{dt} t_2 = m_{ref} t_2 \quad (10)$$

(7), (8) ve (10) kullanılarak

$$h = m_2 t_2 + m_{ref} t_2 \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{h}{m_2 + m_{ref}} \quad (12)$$

elde edilir. (6) ve (12) eşitlikleri kullanılarak toplam periyot hesaplanır.

$$T_p = t_1 + t_2 \quad (13)$$

$$T_p = \frac{h}{m_1 - m_{ref}} + \frac{h}{m_2 + m_{ref}} \quad (14)$$

Buradan sabit periyot için histerezis bandı

$$h = \frac{T_p \cdot (m_2 + m_{ref}) \cdot (m_1 - m_{ref})}{m_1 + m_2} \quad (15)$$

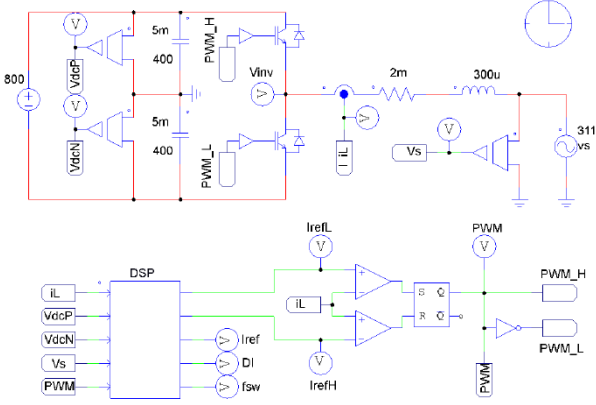
$$DI = h/2 \quad (16)$$

olarak elde edilir. Yöntemin test edilmesi için Şekil 4'te gösterilen devre PSIM ortamında kurulmuştur. Kontrol devresinde iki adet karşılaştırıcı ve 1 adet RS flip flop kullanılmıştır. Faz kolunun pozitif elemanı iletimde iken endüktans akımı artmaktadır. Endüktans akımı I_{refH} değerini geçtiğinde RS flip flopun RESET bacağına bağlı olan karşılaştırıcının çıkışı lojik 1 olmaktadır. Bu durumda PWM=0 olur ve akım azalmaya başlar. Endüktans akımı I_{refL} değerinin altına düştüğünde RS flip flopun SET bacağına bağlı olan karşılaştırıcının çıkışı lojik 1 olur. Bu durumda PWM=1 olur ve akım artmaya başlar. İki adet karşılaştırıcı ve bir adet RS flip flop ile analog histerezis yönteminin gerçekleştirilmesi uzun yıllardır uygulanan eski bir yöntemdir. Bu analog temelli kontrol yapının tamamı DSP içerisinde gerçekleştirilmiştir. Günümüzde yeni DSP'ler içerisinde karşılaştırıcı, DAC ve RS flip flop bulunmaktadır. DI bandı her T_s süresinde DSP tarafından hesaplanarak, I_{ref} ve DI kullanılarak I_{refH} ve I_{refL} bulunmuş, bu değerler DAC'lara yüklenerek karşılaştırıcı girişlerine uygulanmıştır. Bundan sonraki kısım donanımsal olarak çalışmaktadır. DSP'nin hesaplama yükü sadece DI bandını hesaplamaktan ibarettir. Hesaplama süresi (T_s) 10-100us arasında seçilebilir. Dolayısıyla yöntem DSP'de bir işlem yükü oluşturmamaktadır. Sabit frekans için (15) eşitliğinde verilen histerezis bandı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. İnverter çıkışındaki akımın sinüzoidal bir referansı takip etmesi hedeflenmektedir. Önerilen yöntemde anahtarlama frekansını sabit tutmak üzere DI histerezis bandı değiştirilmektedir.

Şekil 4'te şebeke gerilimi $V_s = 311\sin(2\pi 50t)$ ve $I_{ref} = 100\sin(2\pi 50t)$ alınmıştır. DC bara gerilimi $V_{dc}=800V$, dc bara kondansatörleri $C=5mF$, başlangıç değerleri $V_{dcP}=V_{dcN}=400V$, $L=300\mu H$ seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre frekansın büyük ölçüde sabit kaldığı görülmektedir. Her T_s örnekleme periyodunda DI bandı hesaplanmakta, I_{refH} ve I_{refL} değerleri güncellenmekte yani DAC'lara yüklenmektedir. PSIM programında örnekleme zamanı 200ns alınmıştır.

Anahtarlama şekillerinin anlaşılabilmesi açısından simülasyonlar düşük frekansta yapılmıştır. 3kHz anahtarlama

frekansı güç elektroniği uygulamaları için düşük kabul edilen bir frekanstır. Güç elektroniği uygulamalarında güç ve gerilim arttıkça anahtarlama frekansının düşürülmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Düşük frekansta kontrol yapmak daha zorlaşmaktadır. Histeresis kontrol yönteminin özellikle düşük frekans ve yüksek güçlü uygulamalarda daha cazip olacağı öngörülmektedir.



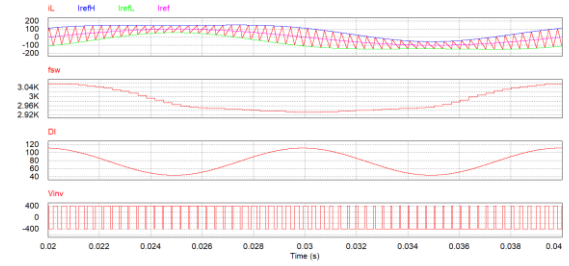
Şekil 4. Şebekeye enerji aktaran bir inverterde sabit frekanslı histeresis yöntemi

3. Simülasyon Sonuçları

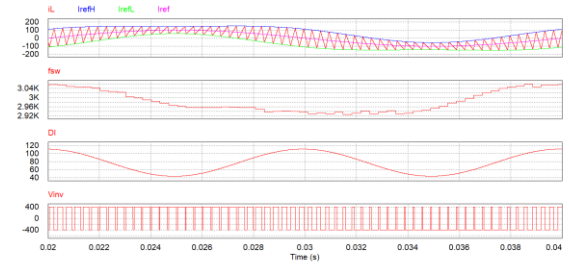
PSIM ortamında gerçekleştirilen simülasyonda Şekil 4'teki devre kullanılmıştır. Sonuçlar örnekleme süresi, dc bara gerilimi ve endüktans parametrelerine göre elde edilmiştir. Bu parametrelerin değişimine göre simülasyon sonuçları yorumlanmıştır. Ayrıca akım harmoniklerinin etkisi de incelenmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi geliştirilen yöntem ile anahtarlama frekansı büyük ölçüde sabit tutulabilmektedir. Simülasyonda örnekleme süresi 200ns alınmıştır. Bir periyod boyunca histeresis bandı değiştirilerek frekans sabit tutulmuştur. Histeresis bandının güncellenmesi her 1µs'de bir yapılmıştır. Bu oldukça hızlı bir güncellemedir. Bu durumda bandın hesaplanması ve güncellenmesi işlemcinin zamanının önemli bir bölümünü alacaktır. Burada tüm parametrelerin doğru bilindiği ve ölçüldüğü kabul edilmiştir. Parametrelerin doğru olmaması durumunda frekans istenilen değerde sabit tutulamaz.

$T_s=1\mu s$ durumu analog sisteme eşdeğer kabul edilebilir. İşlemci yükünü azaltmak için $T_s=20\mu s$ alınarak simülasyonlar tekrarlanmıştır. Şekil 6'daki sonuçların $T_s=1\mu s$ durumu ile benzer olduğu görülmektedir. T_s süresinin çok küçük seçilmesinin gerekli olmadığı sonucuna varılmıştır. $f_{sw_ref}=3kHz$ civarında çok küçük bir aralıkta dalgalanmaktadır. Uygulamada ölü zaman, parametre değerlerinde hatalar vb. nedeniyle farklılıklar oluşacağı öngörülmektedir.

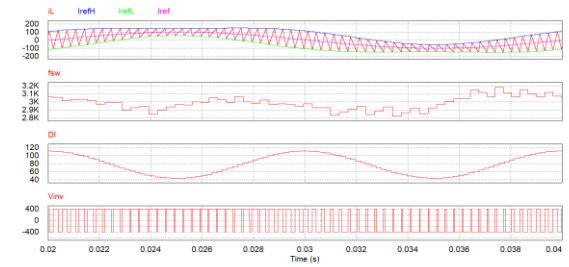


Şekil 5. Yeni yöntemde bandın değiştirilerek frekansın sabit tutulması ($T_s=1\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400V=sbt$) için değişimler

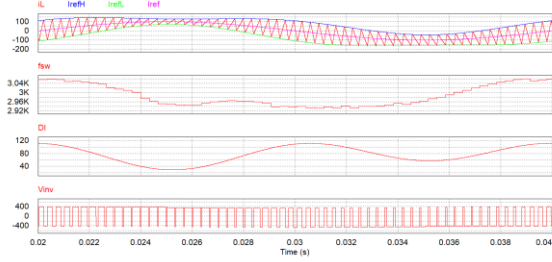


Şekil 6. $T_s=20\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400V=sbt$ için değişimler

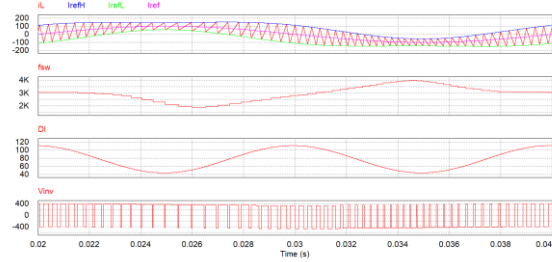
Şekil 7'de T_s süresi 200µs olduğunda yine anahtarlama frekansında önemli bir değişim olmamaktadır. Dolayısıyla bu yöntem büyük T_s süreleri kullanılarak DSP ile rahatlıkla gerçekleştirilebilir. Referans akımın değişim hızına uygun bir T_s seçilerek hesaplama yükü ve doğruluk açısından en uygun değer elde edilebilir. Şekil 8'deki sonuçlarda V_{dcP} ve V_{dcN} gerilimlerinin sabit olmaması (dalgalanma olması) durumunda bant genişliği formülünün başarımı incelenmiştir. Histeresis bandı hesabında V_{dcP} , V_{dcN} ve akım referansının değişim hızı hesaba katılmıştır. Gerilim değişimleri hesaba katıldığında anahtarlama frekansında önemli bir hata olmadığı görülmektedir.



Şekil 7. $T_s=200\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400V=sbt$ için değişimler

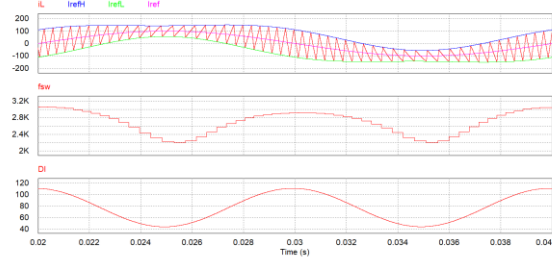


Şekil 8. $T_s=20\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$ için değişimler (V_{dcP} ve V_{dcN} sabit değil)



Şekil 9. $T_s=20\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$ için değişimler (V_{dcP} ve V_{dcN} sabit değil) (literatürdeki hesaba göre $V_{dcP}=V_{dcN}=V_{dc}/2$ alınıyor)

Şekil 9'da V_{dcP} ve V_{dcN} gerilimlerinde oluşan dalgalanma hesaba katıldığında frekansta büyük değişimler oluşmaktadır.

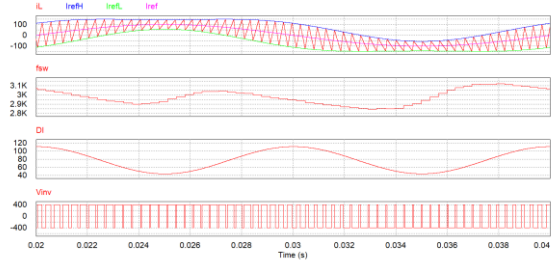


Şekil 10. $r_L = 250\text{mohm}$ alınarak yapılan simülasyon sonuçları

Endüktansın iç direncine bağlı olarak da anahtarlama frekansı değişmektedir. Şekil 10'da hesaplamada kullanılan r_L değeri arttıkça çalışma frekansı, hedeflenen anahtarlama frekansının altında oluşmaktadır. Simülasyonda seçilen değer pratikte karşılaşılan değer çok üstündedir. Uygulamada bu kadar yüksek bir direnç değeri olmayacağı varsayılabilir. Zamanla endüktansın aşırı ısınması nedeniyle direnç değeri artabilir ve frekansı etkileyebilir. Şekil 11'de akım referansının türevi kullanılmadığında frekans dalgalanmasının arttığı görülmüştür. Bu durum özellikle referans akımın değişim hızı yüksek olduğunda daha önemli hale gelmektedir. Özellikle 400Hz uygulamalarında ve non-linear yüklerde m_{ref} parametresinin kullanılmaması frekansta büyük hata oluşturabilir.

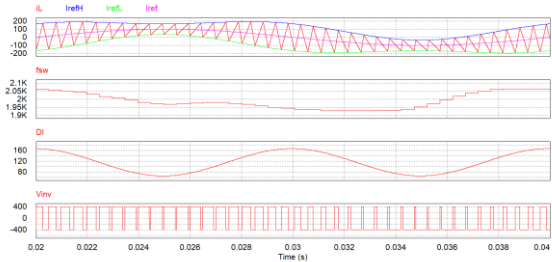
Endüktans değerinin doğru bilinmemesi durumunda frekans istenilen değerde tutulamamaktadır. Şekil 12'deki simülasyon sonuçlarındaki DI hesabında L değeri 300u alınmıştır. Devrede ise 200u kullanılmıştır. Bu şartlarda anahtarlama frekansı

hedeflenen değer üstünde gerçekleşmiştir. Devrede endüktans değerinin 400u yapılması durumunda ise anahtarlama frekansının düştüğü görülmüştür. Şekil 13'teki simülasyon sonuçlarında DI hesabında L değeri 300u alınmıştır. Devrede 400u kullanılmıştır. Bu şartlarda frekans hesaplanan değer altında gerçekleşmiştir.



Şekil 11. $T_s=20\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400\text{V}=\text{sbt}$, $m_{ref}=0$ için değişimler

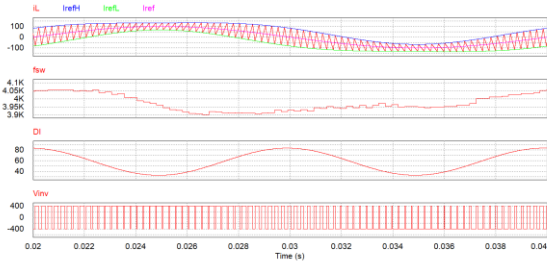
Şekil 14'te yöntemin yüksek frekanslarda da çalıştığını göstermek amacıyla $f_{sw_ref} = 20\text{kHz}$ için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Değişimde anahtarlama frekansında bir miktar dalgalanma olduğu görülmektedir. Hesaplanan bant uygulandığında anahtarlama frekansı referans değerden biraz düşük çıkmaktadır. Frekansın ortalama değerinin yükseltilmesi kontrol ile mümkündür. Fakat bir şebeke periyodunda anahtarlama frekansındaki dalgalanmanın yok edilmesinin kolay olmadığı anlaşılmaktadır. Buna rağmen anahtarlama frekansında bu kadar dalgalanma olmasının bir mahzuru bulunmamaktadır. Hatta EMI açısından yararı olacağı bile söylenebilir. Şöyle ki, literatürde EMI etkisini azaltmak için çeşitli yöntemler yer almaktadır. Bunlardan biri de frekans titreşim yöntemidir. Belirli bir frekans titreşim genliği ile EMI etkinin azaltıldığı gözlemlenmektedir [18]. Şekil 15'te daha önceden yapılmış bir çalışmadan alınan sonuçlarda da görüldüğü gibi frekans titreşim yönteminin EMI üzerinde olumlu bir etkiye sebep olduğu görülmektedir.



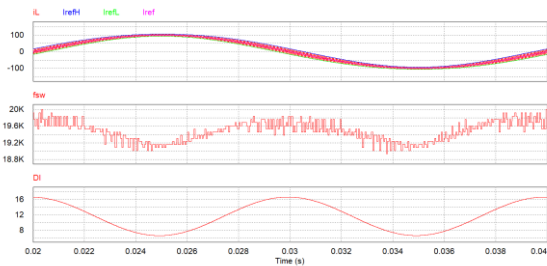
Şekil 12. $T_s=20\mu s$, $\text{delt}=200\text{ns}$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400\text{V}=\text{sbt}$, $L=200\mu$ için değişimler

Çalışmada ek olarak akımın fourier analizi yapılmış ve harmoniklerin etkisi incelenmiştir. Sabit bant ve değişken bant için harmonik bileşenler karşılaştırılmalı olarak Şekil 16(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Burada anahtarlama frekansı 20kHz ve akım referansının genliği 100A için değerlendirme yapılmıştır. Şekil 16(a)'da, sabit bantlı durum için akımın temel bileşeninin efektif değerinin 70.64A ve toplam harmonik distorsiyonu (THD)'nun % 16.50 olduğu görülmektedir. Şekil 16(b)'de ise, sabit frekans için değişken bantlı durum gösterilmektedir. Yine

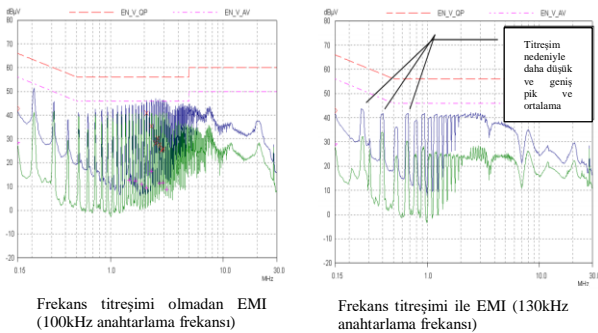
temel bileşenin efektif değerinin 70,64A ve THD'nin ise % 9.99 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak değişken bantlı histeresis akım kontrolünde akım harmoniklerinin etkisinin azaltıldığı görülmüştür.



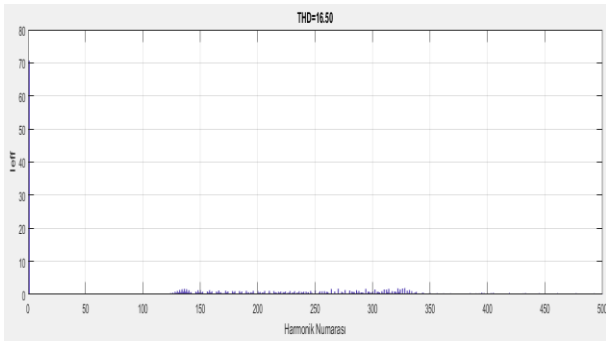
Şekil 13. $T_s=20\mu s$, $\Delta t=200ns$, $V_{dcP}=V_{dcN}=400V=sbt$, $L=400\mu$ için değişimler



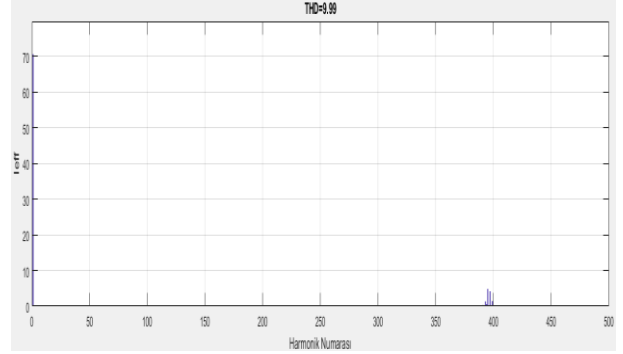
Şekil 14. $f_{sw_ref}=20kHz$ için değişimler



Şekil 15. Frekans titreşimi ile EMI etkisi [18]



Şekil 16(a). Sabit bant için akımın harmonik analizi



Şekil 16(b). Değişken bant için akımın harmonik analizi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki seviyeli tek fazlı gerilim kaynaklı inverter için yeni bir histeresis akım kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem ile elde edilen veriler geleneksel yöntem ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Sabit anahtarlama frekansı için gerekli bant değeri matematiksel olarak elde edilmiştir. Referans akımın değişim hızına bağlı olarak kabul edilebilir seviyede bir örnekleme süresi belirlenmiş ve elde edilen sonuçların küçük örnekleme süresinde elde edilen sonuçlardan çok da farklı olmadığı görülmüştür. DC bara gerilimindeki dalgalanmanın etkisi incelenmiş ve dc bara gerilimindeki dalgalanmanın frekansta dalgalanmaya sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca endüktans parametresinin frekansa etkisi incelenmiştir. Akım referansının eğiminin frekansa etkisi incelenmiş ve eğim değeri doğru kullanılmadığında frekans dalgalanmasında artış gözlemlenmiştir. Bu durum akım referansının değişiminin yüksek olduğu uygulamalarda daha önemli hale gelmektedir. Önerilen yöntem ile sabit frekanslı histeresis akım kontrolü gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen yöntem güç elektroniği uygulamalarında akım kontrol performansını artırmakta ve sabit frekanslı PWM yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilir.

5. Kaynakça

- [1] D. G. Holmes, R. Davoodnezhad, B. P. McGrath, "An improved three-phase variable-band hysteresis current regulator", IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 1, pp. 441 – 450, Jan 2013 .
- [2] R. Davoodnezhad, D. G. Holmes, B. P. McGrath, "A novel three-level hysteresis current regulation strategy for three-phase three-level inverters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 29, no. 11, pp. 6100-6109, Nov. 2014.
- [3] S. Buso, S. Fasolo, L. Malesani, P. Mattavelli, "A dead-beat adaptive hysteresis current control," IEEE Trans. on Ind. App., vol. 36, no. 4, pp. 1174-1180, July/August 2000.
- [4] H. Mao, X. Yang, Z. Chen, Z. Wang, "A hysteresis current controller for single-phase three-level voltage source inverters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 27, no. 7, pp. 3330-3339, July 2012.
- [5] C. N. Ho, V. S. P. Cheung, H. S. Chung, "Constant-frequency hysteresis current control of grid-connected VSI without bandwidth control," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 24, no. 11, pp. 2484-2495, Nov. 2009.
- [6] L. Malesani, L. Rossetto, P. Tomasin, A. Zuccato, "Digital adaptive hysteresis current control with clocked

- commutations and wide operating range,” *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. 32, no. 2, pp. 316-325, March/April 1996.
- [7] W. Stefanutti, P. Mattavelli, “Fully digital hysteresis modulation with switching-time prediction,” *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. 42, no. 3, pp. 763-769, May/June 2006.
- [8] L. Malesani, P. Mattavelli, P. Tomasin, “Improved constant-frequency hysteresis current control of VSI inverters with simple feedforward bandwidth prediction,” *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. 33, no. 5, pp. 1194-1202, Sep./Oct. 1997.
- [9] S. Buso, L. Malesani, P. Mattavelli, “Comparison of current control techniques for active filter applications,” *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 722-729, Oct. 1998.
- [10] L. Malesani, P. Mattavelli, P. Tomasin, “High-performance hysteresis modulation technique for active filters,” *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 12, no. 5, pp. 876-884, Sep. 1997.
- [11] L. Malesani, P. Tenti, “A novel hysteresis control method for current-controlled voltage-source PWM inverters with constant modulation frequency,” *IEEE Trans. on Ind. App.*, vol. 26, no. 1, pp. 88-92, Jan./Feb. 1990.
- [12] E. Aldabas, L. Romeral, A. Arias, M.G. Jayne, “Software-based digital hysteresis-band current controller,” *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 2, pp. 184-190, Mar. 2006.
- [13] F. Liu, A. I. Maswood, “A novel variable hysteresis band current control of three-phase three-level unity PF rectifier with constant switching frequency,” *IEEE Trans on Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 1727-1734, Nov. 2006.
- [14] A. K. Panda, R. Patel, “Adaptive hysteresis and fuzzy logic controlled based shunt active power filter resistant to shoot-through phenomenon,” *IET Power Electron.*, Vol. 8, Iss. 10, pp. 1963-1977, 2015.
- [15] A. Fereidouni, M. A. S. Masoum, K. M. Smedley, “Supervisory nearly constant frequency hysteresis current control for active power filter applications in stationary reference frame,” *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 1-12, March 2016.
- [16] B. K. Bose, “An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive system,” *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 402-408, Oct. 1990.
- [17] K. M. Rahman, M. R. Khan, M. A. Choudhury, “Implementation of programmed modulated carrier HCC based on analytical solution for uniform switching of voltage source inverters,” *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 18, no. 1, pp. 188-197, Jan. 2003.
- [18] R. Mayell, E.H. Quek, “A New Integrated Switcher IC Family -- A Feature Rich Solution for Demanding Power Conversion Applications,” *Power Integrations - Technical Article*.