

ÜÇ FAZLI ŞEBEKEYE BAĞLI İNVERTERLERİN UZAY VEKTÖR MODÜLASYONU İLE KONTROLÜ

Evren İŞEN, A. Faruk BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Beşiktaş/İSTANBUL
eisen@yildiz.edu.tr, fbakan@yildiz.edu.tr

Özet: Şebekeye enerji aktaran üç fazlı inverterlerde, şebekeye verilen enerjinin yüksek kaliteli olması için kullanılan filtre ve kontrol yöntemi önem kazanmaktadır. İnverter ile şebeke arasında akımın filtrelenmesi için genellikle basit akım kontrolü sağlanmasından dolayı L filtre kullanılmaktadır. İnverter çıkışında üretilen akımın kontrolü için uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) düşük harmonik içeriği sağlanmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Faz akımı ile faz geriliminin aynı fazda olması ve faz akımının standartlarda belirtilen toplam harmonik distorsiyon (THD) değerini sağlaması gerekmektedir.

Bu çalışmada, 10 kW gücünde şebekeye enerji aktaran üç fazlı gerilim kaynaklı inverterin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İnverterde tam köprü topolojisi, akımı sızdırmak için L filtre ve kontrolde uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) kullanılmıştır. SVPWM tekniği detaylı olarak incelenmiş, sistemin matematiksel modeli çıkartılmış ve sistemin farklı endüktans ve anahtarlama frekanslarındaki performansı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şebekeye enerji aktarımı, üç fazlı inverter, SVPWM, THD.

1. Giriş

Yakıt hücreleri ve fotovoltaik paneller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depo edilmesi yerine şebekeye aktarılması tercih edilmektedir. DC enerjinin AC enerjiye dönüştürülerek şebekeye aktarılması yüksek güçlü uygulamalarda üç fazlı, düşük güçlü uygulamalarda tek fazlı inverterler ile gerçekleştirilmektedir. Şebekeye bağlı inverterler fotovoltaik (PV) ve rüzgâr türbini uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle güneş enerjisi uygulamalarında şebekeye bağlı inverterler PV sistemlerin kalbini oluşturmaktadır. Bu inverterler PV inverter veya şebekeye bağlı inverter olarak da adlandırılmaktadır. Giderek yaygınlaşan PV inverterler konusunda literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır [1],[2].

Üç fazlı şebekeye bağlı PV inverterler genellikle gerilim beslemeli olarak gerçekleştirilmektedir. İnverter akım harmoniklerinin standartlara göre belirli seviyenin altında olması istenmektedir. Akım harmoniklerini azaltmak ve akımın sinüsoidal

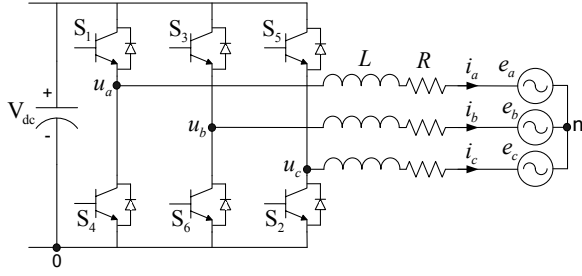
olmasını sağlamak için inverter ile şebeke arasına L, LC veya LCL filtre bağlanır. Kullanılan filtreye göre inverterdeki kontrol yapısı da değişmektedir. LCL filtrenin akım harmonikleri aynı anahtarlama frekansında diğer filtrelere (L ve LC'ye) göre daha düşüktür. Bu nedenle LCL filtrede endüktans değerinin küçültülebilmesi mümkündür. Fakat LCL filtre kullanılan sistemde rezonans oluşma ihtimali ve kondansatörün reaktif güç çekmesi gibi bazı problemler oluşmaktadır. Bu problemlerin ortadan kaldırılabilmesi için karmaşık bir kontrol yapısı gerekmektedir. Literatürde farklı filtreler için geliştirilmiş çok sayıda kontrol yöntemi bulunmaktadır [3].

İnverter kontrolünde uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) ve histerezis akım kontrol (HCC) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. HCC yönteminde dinamik cevap oldukça iyidir, fakat anahtarlama frekansı ve akım harmonikleri değişkendir. SVPWM kontrol yönteminde akım hata kompanzasyonu ve anahtarlama sinyali üretme işlemi iki aşamada gerçekleştirilir. Bu kontrol yönteminin avantajları sabit anahtarlama frekansı, optimum anahtarlama sinyali üretimi, düşük harmonik içeriği ve DC bara geriliminin etkin kullanımı olarak sıralanabilir. Optimum anahtarlama sinyallerinin üretilmesi ile akımın harmonik içeriğinde ve anahtarlama kayıplarında azalma sağlanır. DC bara gerilimi kullanımı bakımından klasik PWM yöntemlerine göre %15 daha etkin bir kullanım sağlamaktadır [4],[5].

Bu çalışmada, şebekeye bağlı üç fazlı bir inverterin matematiksel modeli çıkartılmış ve inverter kontrolünde kullanılan SVPWM yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Sistem MATLAB/Simulink ortamında 10 kW çıkış gücü için simüle edilmiştir. İnverter ile şebeke arasında L filtre kullanılmış, sistemin performansı farklı DC bara gerilimleri, filtre endüktansları ve anahtarlama frekanslarında detaylı olarak incelenmiştir.

2. Sistemin Matematiksel Modeli

Üç fazlı şebekeye bağlı gerilim kaynaklı inverter sistemi Şekil 1'de verilmiştir. Sistem, DC gerilim kaynağı (V_{dc}), altı adet anahtarlama elemanından (S_1-S_6) oluşan üç fazlı tam köprü inverter, filtre (L), endüktansın eşdeğer seri direnci (R) ve üç faz şebeke geriliminden (e_a, e_b, e_c) oluşmaktadır.



Şekil 1. Üç fazlı şebekeye bağlı inverter sistemi.

u_A , u_B ve u_C inverter gerilimleri DC baranın “0” noktasına göre tanımlanmıştır. Enerji aktarımı yapılan üç fazlı şebekenin gerilimleri,

$$e_a = V_m \sin(2\pi f_1 t) \quad (1)$$

$$e_b = V_m \sin(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2)$$

$$e_c = V_m \sin(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Bu eşitliklerde bulunan (f_1) şebeke frekansını ve (V_m) faz gerilimi tepe değerini temsil etmektedir. İnverterin her fazı için gerilim eşitlikleri yazılırsa,

$$u_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + u_{n0} \quad (4)$$

$$u_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + u_{n0} \quad (5)$$

$$u_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + u_{n0} \quad (6)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerde, şebekenin nötr noktası “n” ile DC baranın “0” noktası arasındaki gerilim u_{n0} olarak tanımlanır.

$$u_{n0} = (u_a + u_b + u_c) / 3 \quad (7)$$

İnverterin faz çıkış gerilimleri her bir kolun anahtarlama durumuna bağlı olarak değişmektedir. İlgili fazın çıkış gerilimi, ilgili kolun üst anahtar iletime girdiğinde DC bara gerilimine eşit olur. Üst anahtar kesime girip alt anahtar iletime girdiğinde ise faz gerilimi sıfır olmaktadır. Üç faz için değişimin genelleştirilmiş matematik ifadesi (8) eşitliğinde verilmiştir.

$$u_i = S_i \cdot V_{dc} = \begin{cases} V_{dc}, & S_i = 1 \\ 0, & S_i = 0 \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (8)$$

Bir fazın üst anahtarı iletimde olduğunda $S=1$ ve alt anahtar iletime girdiğinde $S=0$ olmaktadır. (4)-(8) eşitlikleri kullanılarak sistemin durum uzay denklemleri

$$\dot{x} = Au + y = Cx \quad (9)$$

formunda yazılabilir. Bu eşitlikteki durum ve giriş vektörleri (10),(11) ve katsayı matrisleri (12),(13), (14) eşitliklerinde verilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u = \begin{bmatrix} S_a V_{dc} - e_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \\ S_b V_{dc} - e_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \\ S_c V_{dc} - e_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

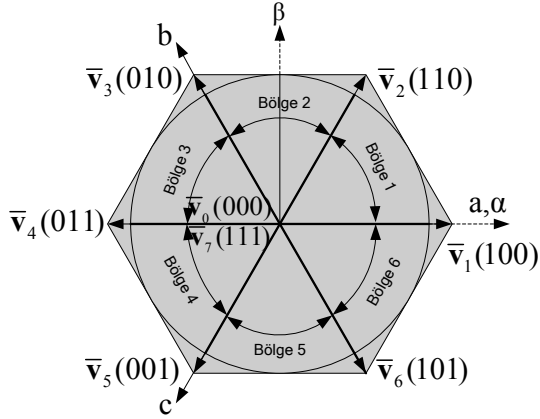
$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (SVPWM)

Üç fazlı gerilim kaynaklı inverterde farklı anahtarlama durumlarına göre altı adet aktif anahtarlama durumu ve iki adet sıfır anahtarlama durumu ortaya çıkmaktadır. Şekil 2’de bu anahtarlama durumlarına göre oluşan aktif ve sıfır vektörler görülmektedir. Bu vektörler arasında 60° açı bulunmakta ve vektörler bir altgen oluşturmaktadır.

İnverter, şebekeye verilecek olan akım referans değerine bağlı olarak çıkış gerilimi vektörü üretmektedir. Bu gerilim vektörü, bulunduğu bölgenin aktif komşu vektörleri ve sıfır vektörleri kullanılarak SVPWM kontrol yöntemi ile üretilir.



Şekil 2. İnverter gerilim vektörleri.

SVPWM kontrol yönteminde büyüklükler ikili eksen takımında kontrol edilmektedir. Üç fazlı akım ve gerilim büyüklükleri dönüşüm matrisi kullanılarak ikili eksen takımına indirgenir. Bu dönüşüm işlemi (15)'de verilen Clarke dönüşüm matrisi yardımı ile yapılmaktadır [6].

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

SVPWM yönteminde referans gerilim vektörünün üretilmesi için gerekli olan anahtarlama durumunun tespiti üç adımda gerçekleştirilir. İlk adımda, referans gerilim vektörünün α - β bileşenleri kullanılarak gerilim vektörü ve bu vektörün açısı sırasıyla (16) ve (17) eşitlikleri kullanılarak tespit edilir.

$$\bar{V}_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (16)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (17)$$

Zamana bağlı olarak değişen θ açısı ile beraber vektörün içinde bulunduğu bölge de değişmektedir. İkinci adımda, referans gerilim vektörünün bulunduğu bölge tespit edilmektedir. Bu bölgeye bağlı olarak referans vektöre komşu olan aktif vektörler ve sıfır vektörleri tespit edilerek bu vektörlerin süreleri hesaplanır. Örneğin referans gerilim vektörü $0 < \theta < 60^\circ$ aralığında iken, V_1 , V_2 , V_0 ve V_7 vektörleri kullanılır. Bu vektörler arasındaki ilişki (18) eşitliğinde verilmiştir. Bu vektörlerin süreleri (19)-(21) eşitlikleri ile hesaplanır [7].

$$\int_0^{T_s} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \bar{V}_0 dt \quad (18)$$

$$T_1 = T_s \frac{3|\bar{V}_{ref}| \sin(\pi/3 - \alpha)}{2V_{dc} \sin(\pi/3)} \quad (19)$$

$$T_2 = T_s \frac{3|\bar{V}_{ref}| \sin(\alpha)}{2V_{dc} \sin(\pi/3)} \quad (20)$$

Aktif ve sıfır vektörlerin toplam süresi anahtarlama periyoduna eşit olduğundan, sıfır vektörünün süresi (21) eşitliği ile hesaplanır.

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (21)$$

Vektörlerin süre hesabı genelleştirilmiş olarak (22), (23) eşitlikleri hesaplanır. Bu eşitliklerde, n bölge numarasını göstermektedir.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cdot \cos \theta - \cos \frac{n}{3} \pi \cdot \sin \theta \right) \quad (22)$$

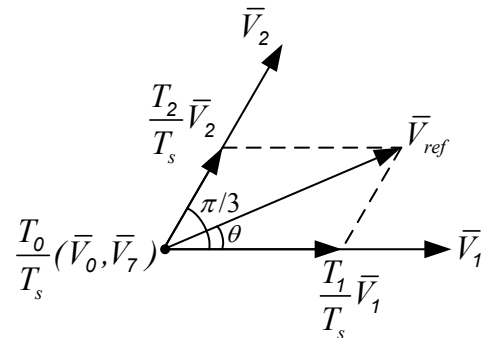
$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\sin \frac{n-1}{3} \pi \cos \theta + \cos \frac{n-1}{3} \pi \sin \theta \right) \quad (23)$$

Vektör süreleri hesaplandıktan sonra anahtarlama elemanlarının iletim süreleri Çizelge 1 yardımıyla hesaplanır.

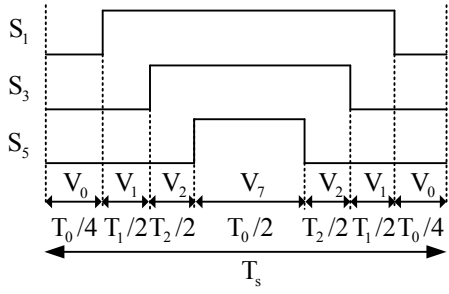
Çizelge 1. Bölgelere göre anahtarlama süreleri

Bölge	Üst anahtarlar	Alt anahtarlar
1	$S_1=T_1+T_2+T_0/2$ $S_3=T_2+T_0/2$ $S_5=T_0/2$	$S_4=T_0/2$ $S_6=T_1+T_0/2$ $S_2=T_1+T_2+T_0/2$
2	$S_1=T_1+T_0/2$ $S_3=T_1+T_2+T_0/2$ $S_5=T_0/2$	$S_4=T_2+T_0/2$ $S_6=T_0/2$ $S_2=T_1+T_2+T_0/2$
3	$S_1=T_0/2$ $S_3=T_1+T_2+T_0/2$ $S_5=T_2+T_0/2$	$S_4=T_1+T_2+T_0/2$ $S_6=T_0/2$ $S_2=T_1+T_0/2$
4	$S_1=T_0/2$ $S_3=T_1+T_0/2$ $S_5=T_1+T_2+T_0/2$	$S_4=T_1+T_2+T_0/2$ $S_6=T_0/2+T_2$ $S_2=T_0/2$
5	$S_1=T_1+T_0/2$ $S_3=T_0/2$ $S_5=T_1+T_2+T_0/2$	$S_4=T_1+T_0/2$ $S_6=T_1+T_2+T_0/2$ $S_2=T_0/2$
6	$S_1=T_1+T_2+T_0/2$ $S_3=T_0/2$ $S_5=T_1+T_0/2$	$S_4=T_0/2$ $S_6=T_1+T_2+T_0/2$ $S_2=T_2+T_0/2$

1 nolu bölgedeki vektörler Şekil 3'te, inverter elemanlarına ait anahtarlama sinyalleri Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. bölgedeki vektörler.



Şekil 4. SVPWM yönteminde 1 nolu bölgede PWM sinyalleri.

4. Simülasyon Sonuçları

Şebekeye bağlı üç fazlı inverter MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Simülasyonlarda, şebeke gerilimi 220 V, şebeke frekansı 50Hz, referans şebeke akımı 15 A ve DC bara gerilimi 800 V alınmıştır. Durum uzay denklemleri kullanılarak gerçekleştirilen Simulink modeli Şekil 5'te görülmektedir. SVPWM kontrollü inverterde muhtelif filtre endüktans değerleri, DC bara gerilimleri ve anahtarlama frekansları için çıkış akımı THD değişimleri elde edilmiştir. Farklı sistem parametrelerinde SVPWM yöntemi ile elde edilen şebeke akımı THD değişimleri Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

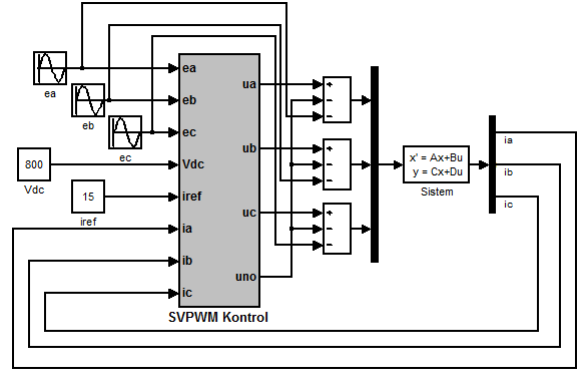
Şekil 6'da farklı anahtarlama frekansları ve filtre endüktans değerleri için şebeke akımı THD değişim eğrileri görülmektedir. Bu değişimler 800 V DC bara geriliminde elde edilmiştir. Değişimlerde L değerinin ve anahtarlama frekansının artması ile THD değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni artan L değeri daha etkin bir filtreleme ve yüksek anahtarlama frekansının hızlı kontrol sağlamasıdır. THD < %5 şartını sağlayan endüktans değeri ve anahtarlama frekansı bu eğriler kullanılarak tespit edilebilir. Bu seçim yapılırken anahtarlama frekansının artması ile anahtarlama kayıplarının artacağı, L değerinin yüksek seçilmesi ile sistemin hacim ve maliyetinin artarak, dinamik cevabın yavaşlayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 7'de filtre endüktans değeri 3 mH seçilerek farklı anahtarlama frekansları ve DC bara gerilimleri için elde edilen THD değişimleri verilmiştir. DC bara geriliminin yükselmesi ile THD değerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi, endüktans geriliminin yükselmesinden dolayı akımın değişim hızının yükselmesidir. Aynı anahtarlama frekansında yüksek DC bara gerilimi kullanıldığında, akımdaki değişim hızının artışı yüksek akım dalgalanmasına ve THD değerinin yükselmesine sebep olmaktadır.

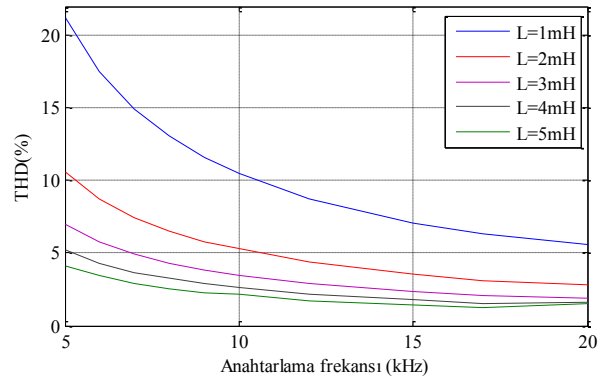
Analiz sonucu elde edilen parametrik eğriler kullanılarak THD < %5 şartını sağlayan uygun endüktans ve anahtarlama frekansı değerleri belirlenmiştir. Filtre endüktansı 3 mH, DC bara

gerilimi 800 V ve inverter anahtarlama frekansı 10 kHz seçilerek yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen üç faz şebeke akımları Şekil 8'de verilmiştir. Akımın THD değeri %3.5 olup standartlarda belirtilen THD < %5 şartı sağlanmaktadır.

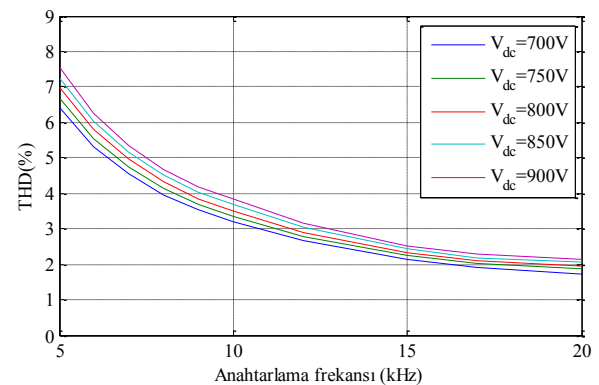
Şekil 9'da, şebeke akımının %50 azalması ve artması durumları için sistemin dinamik cevabı verilmiştir. Kontrolör referans değişimine hızlı cevap vererek akımın yeni referans değerine ulaşmasını sağlamakta ve bir kararsızlık oluşmamaktadır.



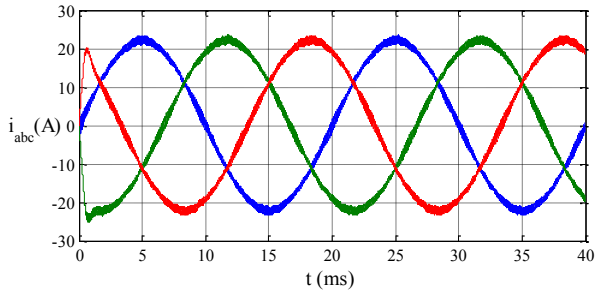
Şekil 5. Sistemin simulink modeli.



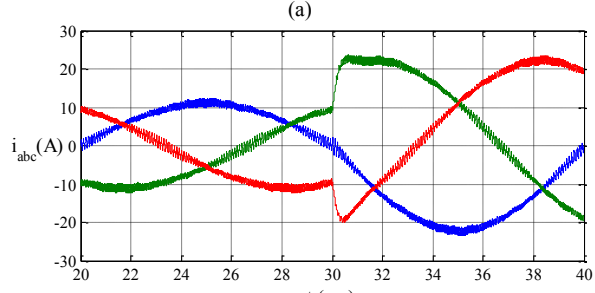
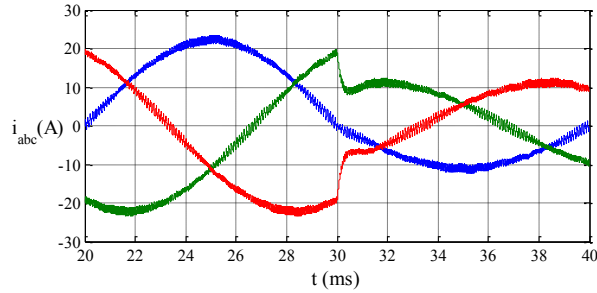
Şekil 6. Farklı filtre endüktans değerleri için anahtarlama frekansına bağlı olarak şebeke akımı THD değişimleri.



Şekil 7. Farklı DC gerilimleri için anahtarlama frekansına bağlı olarak şebeke akımı THD değişimleri.



Şekil 8. Şebekeye enjekte edilen üç faz akım değişimleri.



Şekil 9. Referansın (a) %50 azalma ve (b) %50 artma durumları için dinamik cevap.

5. Sonuç

Bu çalışmada, SVPWM tekniği kullanılan üç fazlı şebekeye bağlı inverter sisteminin matematiksel modeli çıkarılmış ve sistemin farklı endüktans ve anahtarlama frekanslarındaki performansı detaylı olarak incelenmiştir. MATLAB/Simulink programı ile yapılan analizler ile farklı filtre endüktansı, DC bara gerilimi ve anahtarlama frekansı için çıkış akımı THD değişimleri elde edilmiştir. Bu değişimler kullanılarak, standartlarda belirtilen $THD < 5\%$ şartını sağlayan parametreler elde edilebilmektedir. Seçilen uygun parametreler kullanılarak sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiş, kararlı hal ve dinamik cevabı incelenmiştir. Şebekeye enjekte edilen akımın THD değerinin 3.5% olduğu ve kontrolörün referansı hızlı bir şekilde takip ettiği tespit edilmiştir. Şebekeye enerji aktaran inverterlerde parametre seçiminde en önemli şart $THD < 5\%$ şartının sağlanmasıdır. Bununla beraber anahtarlama frekansının artması ile anahtarlama kayıplarının artacağı, L değerinin yüksek seçilmesi ile sistemin hacim ve maliyetinin artarak dinamik cevabın yavaşlayacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynaklar

- [1] F.Blaabjerg, Z. Chen and S.B. Kjaer, "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol 19, no. 5, pp.1184-1194, Sep. 2004.
- [2] F.Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A.V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [3] F. Liu, X. Zha, Y. Zhou and S. Duan, "Design and Research on Parameter of LCL Filter in Three-Phase Grid-Connected Inverter," *IEEE Power Electron. and Motion Control Conf., IPEMC'09*, May. 2009, pp. 2174-2177.
- [4] K. Zhou and D. Wang, "Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol 49, no. 1, pp.186-196, Feb. 2002.
- [5] Q. Zeng and L.Chang, "Study of Advanced Current Control Strategies for Three-Phase Grid-Connected PWM Inverters for Distributed Generation," *IEEE Conf. on Control Appl.*, Aug. 2005, pp.1311-1316.
- [6] H. R. N. Pouya and H. Mokhtari, "Control of Parallel Three-Phase Inverters Using Optimal and SVPWM Technique," *IEEE Int. Symposium on Ind. Electron.*, (ISIE 2009), July 2009, pp. 1823-1828.
- [7] X. Wen and X. Yin, "The SVPWM fast algorithm for three-phase inverters," *Int. Power Engineering Conf., IPEC 2007*, pp. 1043-1047.

Bu çalışma, 110E212 numaralı proje kapsamında TUBİTAK tarafından desteklenmiştir.