

Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Güç Kontrolünde Uzay Vektörü PWM ve Histerezis Akım Kontrolü Tekniklerinin Karşılaştırılması

Comparison of Space Vector PWM, Hysteresis Current Control Techniques in Power Control of Permanent Magnet Synchronous Generator used in Wind Turbines

Naim Süleyman TING¹, İsmail AKSOY¹, Yakup ŞAHİN¹

¹Elektrik Elektronik Fakültesi – Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi

nsting@yildiz.edu.tr, iaksoy@yildiz.edu.tr, ysahin@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün (SMSG) şebekeye enerji aktarımı ve güç kontrolünde generatör tarafı ve şebeke tarafı arasında enerji akışını sağlayan back to back dönüştürücü için anahtarlama sinyallerinin elde edilmesinde sıklıkla kullanılan uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) ve histerezis akım kontrol (HCC) tekniklerinin sistem performansına etkisi dinamik cevap, toplam harmonik distorsiyonu (THD), moment ve akım dalgalılığı açısından mukayese edilmiştir. Sistemin analizi Matlab/SİMULİNK programında yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında SMSG matematiksel olarak modellenmiş ve gücü yaklaşık 1.8 kW'tur. Generatörün dönmesini sağlayan yük momentini elde etmek için rüzgâr türbin sistemi aerodinamik modeli kurulmuş ve sabit bir rüzgâr hızına göre döndürme momenti aerodinamik modelden elde edilmiştir. Bununla birlikte SMSG'nin şebekeye enerji aktarımı alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemiyle sağlanmıştır. Analiz sonuçlarından SVPWM'in HCC'ye göre genellikle daha verimli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Abstract

In this paper, impact on system performance of SVPWM, and HCC control techniques used to obtain converter switch signals for back to back converter providing to energy transmission to grid side from generator side in the power control of permanent magnet synchronous generator used in wind turbines are comparatively analyzed in terms of dynamic response, total harmonic distortion, torque ripple and current ripple. Analysis of system is realized with MATLAB/Simulink program. Permanent magnet synchronous generator is mathematically modelled and its power is 1.8 kW. Aerodynamic modelling of the wind turbine system is made in order to obtain the load torque providing rotating of generator. However, energy transmission to grid of PMSG is made with field oriented control (FOC). According to analysis results, it has been observed that SVPWM generally has more efficient results than HCC control technique.

1. Giriş

Fosil kaynaklı yakıtların fiyatlarının arttığı, ulaşılabilirliklerinin azaldığı ve daha önemlisi iklim değişiklikleri geri dönülmez bir noktaya ulaştığı için, yenilenebilir enerji sistemleri gittikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (biokütle, güneş, jeotermal, rüzgâr, küçük hidrolar) arasında öne çıkan seçeneklerden birisi de rüzgâr enerjisidir. Son yıllarda rüzgâr enerji sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve verilen devlet destekleri, rüzgâr enerjisinin güç sistemi içindeki payını hızla arttırmaktadır. Rüzgâr gücündeki bu hızlı büyüme, rüzgâr enerjisinin güç sistemine dahil edilmesi ile ilgili olarak birçok çalışmayı ve araştırma konusunu da beraberinde getirmiştir [1].

Rüzgâr türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır.

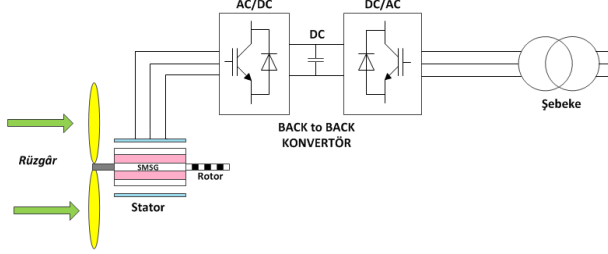
Rüzgâr türbinlerinde üç çeşit generatör kullanılmaktadır.

- 1) Doğru akım generatörü,
- 2) Senkron generatör,
- 3) Asenkron generatör.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım (d.a.) generatörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu generatörler, çeviriciler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve asenkron generatörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar [2]. Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatör ele alınmıştır.

SMSG herhangi bir enerji kaynağına gerek duymadan kendinden uyarımlı olması nedeniyle rüzgâr türbinini uygulamalarında önerilmektedir. En büyük artısı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. Bakım maliyeti düşüktür. Küçük ve hafif uygulamalar için uygundur. Generatör hızı herhangi dışı kutusuna gerek kalmadan kontrol edilebilir. SMSG'nin statoru sargılıdır ve rotoruna sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir. SMSG'nin çok yaygın kullanılan tipleri; radyal akılı, eksenel akılı ve çapraz akılı SMSG'lerdir.

SMSG'ler harekete geçme anında senkronizasyonda ve gerilim regülasyonunda bazı sorunlar çıkartabilir. Ayrıca sürekli mıknatısların fiyatları çok yüksektir. Bir diğer dezavantajı ise mıknatısların manyetik özelliklerinin sıcaklıkla değişmesidir. Yüksek sıcaklıklarda ve kısa devre durumlarında mıknatısların manyetik özelliklerini kaybettikleri bilinmektedir. SMSG'lerin rotor sıcaklıklarının soğutma sistemleri ile kontrolünün sağlanması gereklidir [3].



Şekil 1: SMSG'nin rüzgâr türbini ve şebeke bağlantısı

2. SMSG Rüzgâr Türbin Sistemi

2.1. Aerodinamik Model

Rüzgâr türbininin rüzgârdan sağladığı güç ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r V_w^3 C_p \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{w_e R}{V_w} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{1}{2} (\lambda - 5.6) \cdot \exp(-0.17\lambda) \quad (3)$$

Burada; ρ hava yoğunluğu, A_r türbin kanatlarının taradığı alan, V_w rüzgâr hızı, C_p türbin güç katsayısı, w_e türbin mil hızı, λ uç-hız oranı ve R kanatların çapıdır [4].

2.2. SMSG Matematiksel Modeli

Üç fazlı sabit mıknatıslı senkron generatörün dq referans eksen takımındaki gerilim, akı ve güç ifadelerine ilişkin denklemler aşağıdaki gibidir [4];

$$\dot{\varphi}_{sd} = L_d \dot{i}_{sd} + \varphi_m \quad (4)$$

$$\dot{\varphi}_{sq} = L_q \dot{i}_{sq} \quad (5)$$

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_e \varphi_{sq} \quad (6)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_e \varphi_{sd} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (8)$$

Burada; V_d , V_q ; dq eksenli stator gerilimleri, i_d , i_q ; dq eksenli stator akımları, φ_d , φ_q ; dq eksenli stator akıları, L_d , L_q ; dq eksenli endüktansları, R_s ; stator sargı direnci ve ω_e ; elektriksel hızdır. Yukarıdaki eşitliklerden sabit mıknatıslı senkron makineye ait genel moment ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$T_e = \frac{3}{2} p_p (i_q i_d (L_d - L_q) + \varphi_m i_q) \quad (9)$$

Bu çalışmada kullanılan yüzey mıknatıslı sabit mıknatıslı senkron generatörün özelliğinden dolayı L_d ve L_q

endüktanslarının birbirine eşit olduğu bilindiğine göre bu makinede moment ifadesi i_q akımı ile doğrudan orantılıdır.

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \varphi_m i_q \quad (10)$$

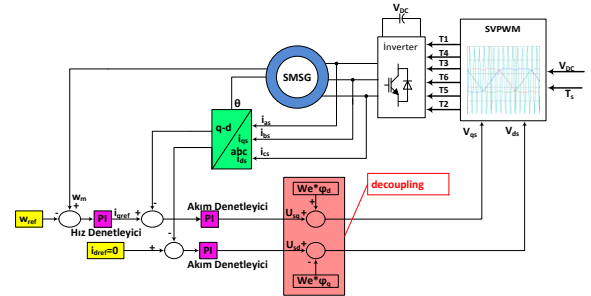
3. Sistemin Kontrolü ve FOC

Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) metodu, momenti sıfır hız dahil düşük hız aralıklarında kontrol eder. Bu metodun temel mantığı, sabit mıknatıslar tarafından oluşturulan akı (φ_m) ile uzay alan hesabı içerisinde generatör akımını kontrol etmektir. Yani başka bir deyimle alan yönlendirmeli kontrol, makinadan arzu edilen momenti almak için q-d rotor referans düzleminde birer vektör olarak gösterilen motor akımlarının bileşenlerini kontrol etmektir. Bu akım bileşenleri q eksen akımı ve d eksen akımı olup, bu akımları elde etmek için pratikte rotor konum bilgisine ihtiyaç duyulur.

SMSG'nin moment ifadesini veren (10) eşitliği incelendiğinde momentin, mıknatıs akısı ve stator q eksen akımı ile orantılı olduğu görülmektedir. Mıknatıs akısı kontrol edilemeyeceği için q akımının kontrolü ile moment kontrolü veya hız kontrolü yapılabilmektedir. SMSG'nin rotorundaki manyetik alan kalıcı mıknatıslar sayesinde elde edildiği için, stator akımları bileşenlerinden rotor manyetik alanını meydana getiren bileşen olan i_d 'ye ihtiyaç kalmamıştır. Ayrıca eşitlik 10'a göre i_d akımının moment üzerinde bir etkisi olmadığından, stator bakır kayıplarını azaltmak için, bu akım bileşeni sıfırda tutulur.

Rüzgâr türbininden şebekeye enerji aktarımında kontrol sistemini generatör tarafı kontrol ve şebeke tarafı kontrol olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

3.1. Generatör Tarafı Kontrol



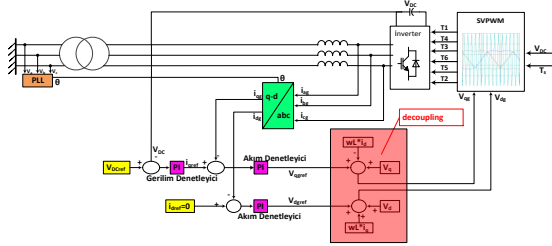
Şekil 2: Generatör tarafı kontrol sistemi bloğu

Şekil 2'deki generatör tarafı alan yönlendirmeli kontrol metodu şu prensiplerde çalışmaktadır. SMSG'den okunan w_m mekanik hızı, gerçekte rüzgâr hızına bağlı olarak gelen w_{ref} hızı ile karşılaştırılır. Hata çıkışı bir PI kontrolörden geçirilir ve hız denetleyici, iki hız arasındaki hataya göre referans i_{qref} akımını üretir. i_{dref} akımı maksimum moment üretimi ve reaktif güçleri yok etmek için sıfır olarak girilir. Daha sonra benzer şekilde bu referans akım değerlerinden V_{sq} ve V_{sd} gerilimleri üretilir. Bu gerilimler Şekil 5'te verilen SVPWM bloğunun girişine uygulanmasıyla generatör tarafı dönüştürücü için gerekli anahtarlama sinyalleri elde edilmiş olur. Bu sinyallerin dönüştürücüye uygulanmasıyla da generatörden gelen AC akım ve gerilimler doğrultularak DC hale getirilir ve back to back dönüştürücünün ikinci kısmı olan şebeke tarafı dönüştürücüye aktarılır. Böylece generatör hızının, girilen referans değere veya o anki rüzgâr hızına karşılık gelen

referans değere eşit tutulması sağlanarak generatör hızı kontrolü sağlanmış olur.

3.2. Şebeke Tarafı Kontrol

Şekil 3'teki şebeke tarafı kontrol metodu şu prensiplerde çalışmaktadır. DC baradan okunan V_{DC} gerilimi, referans olarak girilen V_{DCref} gerilimi ile karşılaştırılır. Gerilim denetleyici PI kontrolör, iki gerilim arasındaki hataya göre referans i_{qref} akımını üretir. Burada da i_{dref} akımı reaktif gücü sıfırlamak için sıfır olarak girilir. Daha sonra V_{qref} ve V_{dref} gerilimlerinin üretilmesinden sonra SVPWM ile şebeke tarafı dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri elde edilir. Bu sinyallerin invertere uygulanmasıyla da DC baradan gelen DC akım ve gerilimler AC hale dönüştürülür. Böylece generatörden gelen akımlar DC barayı sabit tutularak şebekeye aktarılır ve SMSM'ün generatör olarak çalışması sağlanmış olur.



Şekil 3: Şebeke tarafı kontrol sistemi bloğu

4. Kontrol Teknikleri

Rüzgâr türbinlerinde back to back dönüştürücü anahtarlama sinyallerinin elde edilmesinde kullanılan kontrol tekniği uygulanabilirlik ve verimlilik açısından oldukça önem taşımaktadır. İyi bir kontrol sistemi olmazsa üretilen gücün büyük bir kısmı boşa harcanabilir. Bu çalışmada bu kontrol sistemlerinden en yaygın olarak kullanılan iki kontrol tekniği SVPWM ve HCC çeşitli özellikler bakımından kıyaslanmış avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

4.1. Uzak Vektörü Darbe Genişlik Modülasyonu (SVPWM)

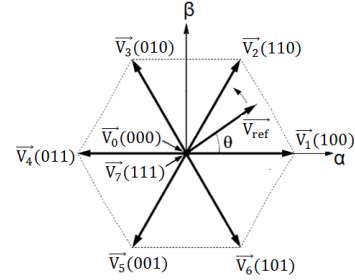
SVPWM güç dönüştürücülerinde yarı iletken güç elemanlarının anahtarlama sırasında kullanılan sayısal bir modülasyon tekniğidir. Bu teknikteki amaç, minimum anahtarlama kaybı ve en düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) ile istenilen çıkış akımı veya gerilimini elde etmektir.

Bu kontrol tekniğinin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Uygun anahtarlama sayısı sayesinde anahtarlama güç kayıpları daha az olmaktadır.
- DC bara geriliminden sinüzoidal darbe genişlik modülasyonuna (SPWM) göre %15 daha fazla yararlanır.
- Optimum anahtarlama sinyali üretimi ile akımın harmoniği daha aza indirgenir.
- Sabit anahtarlama frekansı altında gerçekleştirilir.
- Sayısal bir modülasyon tekniği olduğundan dolayı mikroşemcilerde daha kolay uygulanabilir [5].

Bu avantajların yanında SVPWM sürelerinin hesaplanmasında karmaşık denklemler içermesini de bir dezavantaj olarak söyleyebiliriz.

Uzak vektörü darbe genişlik modülasyonu temel olarak bir inverterde mümkün olan her bir durumun bir ayrı uzay vektörü olarak tanımlanmasına dayanır. Üç fazlı bir inverterde 8 adet anahtarlama durumu vardır. SVPWM metodunun temel prensibi, gerilim beslemeli bir inverter tarafından üretilen 8 ayrı gerilim vektörünü kullanarak ideal gerilim vektörüne mümkün olduğu kadar yaklaşan bir gerilim vektörü sağlamaktır. Sonuç olarak bir altgen içerisinde dönen bir referans gerilim vektörü oluşturulur. Bu altgen 6 aktif vektör ve 2 adet sıfır vektörün birleşiminden meydana gelir (Şekil 4).



Şekil 4: Altgen içerisinde dönen referans vektör

Şekil 4'ten yola çıkarak aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir:

$$\vec{V}_{ref} = V_{\alpha} + jV_{\beta} \quad (10)$$

$$V_{ref} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (11)$$

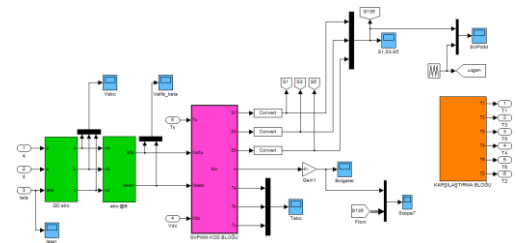
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right) \quad (12)$$

Clarke dönüşümleri kullanılarak referans vektör gerilimi üç faz ekseninde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{V}_{ref} = \frac{2}{3} \left(V_a \cdot e^{j0} + V_b \cdot e^{j2\pi/3} + V_c \cdot e^{j4\pi/3} \right) \quad (13)$$

Eğer V_{abc} ifadelerini eşitlik 13'te yerine yazarsak her bir bölge için referans gerilim ifadesinin genelleştirilmiş halini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\vec{V}_k = \frac{2}{3} \left(V_{dc} \cdot e^{j(k-1)\pi/3} \right) \quad k=1,2,3,4,5,6 \quad (14)$$



Şekil 5: SVPWM kontrolü MATLAB/Simulink bloğu

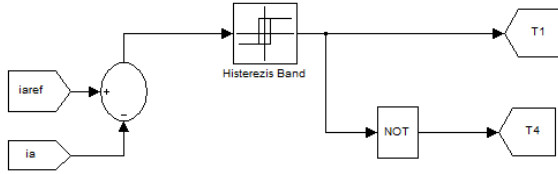
SVPWM kontrol yöntemi ile anahtarlama sinyallerini 4 adımda elde edebiliriz.

1. Adım: Referans gerilim vektörünün bulunduğu bölgenin belirlenmesi,
2. Adım: Anahtarlama sürelerinin (T_a , T_b ve T_0) belirlenmesi,
3. Adım: En uygun anahtarlama sırasına göre S_1 , S_3 ve S_5 diye belirlediğimiz kontrol gerilimlerinin hesaplanması,

4. Adım: S_1 , S_3 ve S_5 kontrol gerilimleri ile taşıyıcı üçgen dalganın karşılaştırılarak transistör sinyallerinin sağlanması. SVPWM ile ilgili daha fazla bilgi [5], [6], [7]'de verilmiştir. MATLAB/Simulink'te kurulan SVPWM bloğu Şekil 5'te verilmiştir.

4.2. Histerezis Akım Kontrolü (HCC)

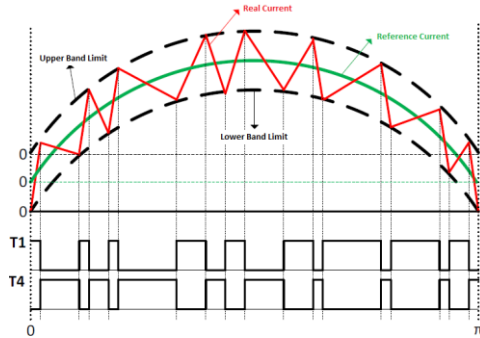
Bu kontrolün amacı, inverter çıkış akımını geri beslemeli bir kontrol döngüsüyle, belirlenen histerezis bandı içerisinde tutmaktır. Şekil 6'da bir faz için HCC blok diyagramı MATLAB/Simulink bloğu verilmiştir.



Şekil 6: Bir faz için HCC MATLAB/Simulink bloğu

Burada histerezis karşılaştırıcı kullanılarak ölçülen yük akımı ve referans akım karşılaştırılır. Herbir karşılaştırıcı yük akımının histerezis bandı içerisinde kalmasını sağlayarak ilgili inverter kolunun anahtarlama durumunu belirler. Histerezis akım kontrolörü ban açısından sabit bantlı ve histerezis bantlı olmak üzere ikiye ayrılır [8].

Şekil 7'de bir faz kolu için histerezis bandı tarafından belirlenen üst bant ve alt bant ile referans ve gerçek akım dalga şekilleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gerçek akım dalgalanması histerezis bandı dışına çıkmamaktadır. Örnek üzerinde anlatacak olursak; üç fazlı bir inverterde birinci faz kolunu göz önüne alalım. Eğer gerçek akım, üst banda ulaşır veya aşarsa birinci faz kolundaki üst sıra elemanı kesime sokulurken ($T_1=0$), alt sıra elemanında iletme sokulur ($T_4=1$) ve akımın azalması sağlanır. Eğer gerçek akım alt banda ulaşır veya altına düşerse bu defa alt sıra elemanı kesime sokulurken ($T_4=0$), üst sıra elemanında iletme sokulur ($T_1=1$) ve böylece bant dışına çıkmaya çalışan akım tekrar bant içerisine sokulur. Böylece, inverterde gerekli anahtarlama yapılmaya akımın histerezis bandı içerisinde dalgalanmasına izin verilir.



Şekil 7: HCCPWM A fazı akım dalgası ve birinci faz kolu transistör kontrol sinyalleri

Bu kontrol tekniğinin en yaygın bilinen avantajları; basit bir kontrol yapısına sahip olması ve yüksek dinamik cevap hızına sahip olmasıdır. Ayrıca yük parametreleri hakkında geri besleme bilgisine ihtiyaç duymaz. Bu avantajlarının yanında akımdaki yüksek dalgalanma, değişken anahtarlama frekansı ve EMI filtre tasarım zorluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır [9].

5. Simülasyon Sonuçları

Bu çalışma anlatılan sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve simule edilmiştir. Sistemde ilk olarak rüzgâr turbini aerodinamik modellemesi yapılmış ve değişken bir rüzgâr hızına karşı elde edilen moment bilgisi generatöre girilerek generatörün dönmesi sağlanmıştır. Simülasyonda kullanılan referans hızın ideal bir rüzgâr hızında optimum hızda çalıştığı varsayılmıştır. Şebekeye güç akışını ayarlayan sabit DC bara gerilimini korumak için dönüştürücüdeki güç elemanlarına SVPWM ve HCC kontrol teknikleri ayrı ayrı uygulanarak iki tekniğin sisteme etkisi çeşitli açılardan incelenmiştir. Bu çalışmada yüzey montajlı sabit mıknatıslı senkron makine kullanılmıştır. Bu makine ile ilgili parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: MSG Parametreleri

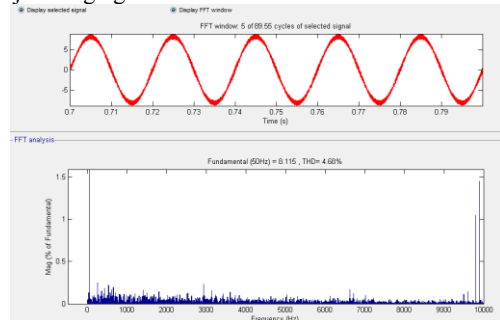
Nominal Güç (P)	1.8 kW
Empedans (R_s)	0.775 Ω
q-ekseni Endüktansı (L_q)	7.31 mH
d-ekseni Endüktansı (L_d)	7.31 mH
Mıknatıslanma Akısı (φ_m)	0.37387 Wb
Moemnt/Akım (T/A)	1.1216 Nm/A
Çift Kutup Sayısı (p_p)	2
Atalet Momenti (J)	0.00126811 kg/m ²
Sürtünme Katsayısı (B)	0

Bununla beraber DC bara kondansatörü 400 V ve generatörün mekanik dönme hızı 200 rd/s'dir. İlaveten sabit rüzgâr hızına karşılık 10 Nm'lik bir yük momenti elde edilmiş ve generatöre uygulanmıştır.

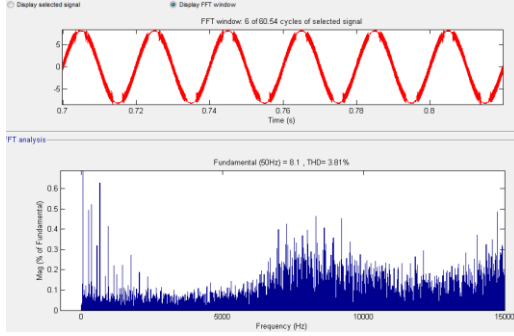
SVPWM'de anahtarlama frekansı sabit ve 10 kHz'dir yalnız HCC'de anahtarlama frekansı değişkendir. Çünkü HCC'de bant genişliğine bağlı olarak akım dalgalanması değişmektedir. Bu yüzden ortak anahtarlama frekansına göre yapılacak karşılaştırma bant genişliği 0.852 girilerek yaklaşık olarak HCC'nin de 10 kHz anahtarlama frekansında çalışması sağlanmıştır.

5.1. THD Açısından Karşılaştırma

Burada şebeke akımları baz alınarak THD karşılaştırması yapılmıştır. SVPWM ile sabit 10 kHz'lik anahtarlama frekansında şebeke akımlarına ilişkin THD % 4.68 olarak gözlemlenmiş ve simülasyon sonucu Şekil 8'de verilmiştir. Buna karşın HCC ile ortalama anahtarlama frekansı 10 kHz iken yine şebeke akımlarına ilişkin THD %3.61 olarak elde edilmiş ve simülasyon sonucu Şekil 9'da verilmiştir. Bu iki sonucun karşılaştırılmasıyla HCC'nin aynı anahtarlama frekansında THD içeriği açısından SVPWM'e göre daha avantajlı olduğu gözükmemektedir.



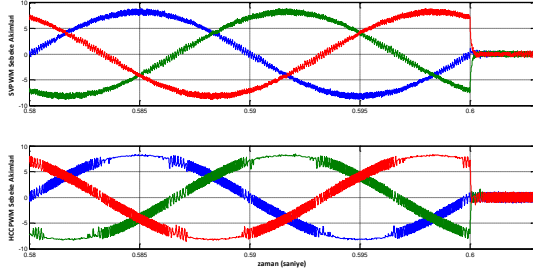
Şekil 8: SVPWM ile elde edilen THD analizi



Şekil 9: HCC ile elde edilen THD analizi

5.2. Dinamik Cevap Açısından Karşılaştırma

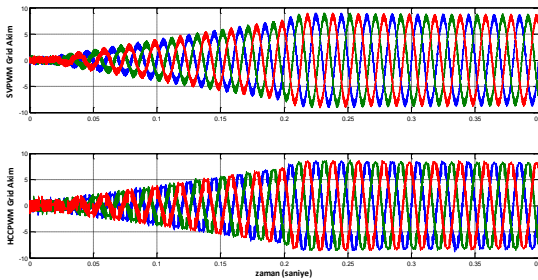
Güç sistemlerinde dinamik cevabın mümkün olduğu kadar hızlı olması istenir. Burada iki kontrol tekniğinin dinamik cevap açısından mukayesesi yük momentinin 0,6. saniyede sıfıra düşmesiyle generatör akımlarının sıfıra oturma süresine göre yapılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10: SVPWM ve HCC ile elde edilen generatör akımları

Şekilden de görüldüğü gibi yük momentinin 0,6. saniyede 0'a düştüğü durumda generatör akımları SVPWM'de akım 200 μ s'de sıfıra düşerken, HCCPWM'de yaklaşık 70 μ s'de sıfıra düşmektedir. Dolayısıyla HCCPWM'in dinamik cevabı SVPWM'den daha iyidir. Bunun en önemli sebeplerinden biri ise kontrol sisteminde SVPWM'de HCC'den daha çok PI kontrolör kullanılmasıdır. Benzer sonuçlar şebeke akımları içinde gözlemlenmiştir.

5.3. Akımlardaki Dalgalanma Açısından Karşılaştırma



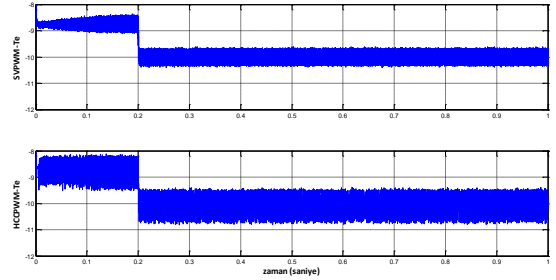
Şekil 11: SVPWM ve HCC ile elde edilen şebeke akımları

Şekil 11'de SVPWM ve HCC ile elde edilen şebeke akımlarına ilişkin dalga şekilleri verilmiştir. HCC'de ortalama anahtarlama frekansını SVPWM anahtarlama frekansıyla eş tutmak için bant genişliği 0.852 girilmiştir. Dolayısıyla akımdaki dalgalanma da 1.704'tür. SVPWM'de ise dalgalılık 1.4 olarak ölçülmüştür. Buradan eşit frekansta SVPWM'in

dalgahlığının daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Dalgalılığı eşitleyebilmek için HCCPWM'in bant genişliği azaltılmalıdır. Buda anahtarlama frekansının artmasına ve anahtarlama kayıplarına yol açmaktadır.

5.4. Moment Dalgahlığı Açısından Karşılaştırma

Dalgalık güç sistemlerinde istenmeyen bir durumdur. Şekil 12'de 10 kHz anahtarlama frekansı ve aynı PI katsayılarına sahip SVPWM ile HCC teknikleriyle elde edilen elektromanyetik momentteki dalgalanma verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi SVPWM'de üretilen moment dalgalanması daha az olmaktadır. Simülasyondan alınan değerlerde HCC ile yapılan kontrolde moment dalgalanması yaklaşık 1.33 iken SVPWM'de 0.75 civarındadır. Dolayısıyla SVPWM'in bu kıyaslamada daha avantajlı olduğu söylenebilir.



Şekil 12: SVPWM ve HCCPWM ile elde edilen elektromanyetik momentteki dalgalanma

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, rüzgâr türbin sistemleri için generatör kontrolünde kullanılan SVPWM ve HCC kontrol tekniklerinin sistem performansına etkisi karşılaştırmalı olarak MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiş ve simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2: SVPWM ve HCC Tekniklerinin Karşılaştırılması

Kontrol Tekniği	Akım THD	Dinamik Cevap	Moment Dalgahlığı	Akım Dalgahlığı
SVPWM	% 4.68	Daha yavaş	Düşük	Düşük
HCC	% 3.61	Daha hızlı	Yüksek	Yüksek

Her ne kadar Çizelge 2'ye göre HCC tekniği THD ve dinamik cevap açısından SVPWM'e göre daha iyi sonuçlar verse de güç sistemlerinin performansında etkili olan dalgalanma ve çizelgede verilmeyen transistör anahtarlama kayıplarını doğrudan etkileyen anahtarlama frekansının SVPWM'de sabit olması ile SVPWM'in rüzgâr türbin sistemlerinde ve güç sistemlerinde kullanımının daha verimli sonuçlar vereceği sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi SVPWM'de minimum anahtarlama ile transistör anahtarlama kayıplarının en aza indirgenmesidir.

7. Kaynaklar

- [1] Koç, E. ve Güven, N., "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme

- Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi", *EMO Bilimsel Dergi*, pp. 51-55, Haziran 2011.
- [2] Uyar, M., Gencoglu, M.T. ve Yıldırım, S., " Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri ", *EMO Bilimsel Dergi*,
- [3] Dursun, E. ve Binark, E.K., "Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler", *UTES*, pp. 667-674, 2008.
- [4] Yang, X., Gong, X. ve Qiao, W., "Mechanical Sensorless Maximum Power Tracking Control for Direct- Drive PMSG Wind Turbines", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 4091-4095, 2010.
- [5] Hendawi, E., Khater, F. ve Shaltout, A., "Anlysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation Inverter", *9th WSEAS International Conference*, pp.124-131, 2009.
- [6] Pradeep, J. ve Devanathan, R., "Comparative Analysis and Simulation of PWM and SVPWM Inverter Fed Permanent Magnet Synchronuos Motor", *ICETEEEM Conference*, pp.299-305, India, 2012
- [7] K.V. Kumar, K.V., Michael, P.A., John, J.P. ve Kumar, S.S., "Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control for Three Phase Inverter", *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, pp. 63-74, 2010
- [8] Nachiappan, A., Sudararajan, K. ve Malarselvam, V., "Current Controlled Voltage Source Inverter Using Hystresis Controller and PI Controller", *EPSCICON Conference*, Kerela, pp. 1-6, 2012.
- [9] İsen, E. ve Bakan, A.F., "Comparison of SVPWM and HCC Control Techniques in Grid Connected Three Phase Inverters", *ELECO* 2010, pp. 264-268.