

Düşük Güçlü Uygulamalar için Konvansiyonel Senkron Generatörler ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Karşılaştırılması

Comparison of Conventional Synchronous Generators and Permanent Magnet Synchronous Generators for Low-Power Applications

Yasemin Öner¹, Selin Özçira¹, Nur Bekiroğlu¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi

yoner@yildiz.edu.tr, sozcira@yildiz.edu.tr, nbekir@yildiz.edu.tr

Özet

Son yıllarda gelişen tasarım programları ve buna bağlı olarak üretilen tasarımlarda gerçekleştirilen yapısal çözümler, küçük güçlünden büyük güçlüye çok geniş bir aralıkta farklı yapılar da elektrik makinası üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu makineler içerisinde bu çalışmada da özellikle incelenecek olan sürekli mıknatıslı senkron generatörler doğrudan tahrike olanak sağlamları, kontrollerinin kolay olması ve verimlerinin yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı rüzgar türbinlerinde, dizel generatörlerde ve küçük hidroelektrik santrallerde tercih edilmektedir. Bu çalışmada düşük güçlü uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmış konvansiyonel silindirik kutuplu senkron generatör ile sürekli mıknatıslı senkron generatörün performans açısından karşılaştırılması MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. SMSG'nin çıkış akımı ve geriliminin yüke bağlı olarak değiştiği, boşta çalışma durumunda konvansiyonel senkron generatörlere göre daha yüksek performans sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Abstract

Recently developed design programs and structural solutions generated accordingly allow the manufacture of a variety of electrical machines in a wide range of power. Permanent magnet synchronous generators that are studied in this present paper are especially preferred in small hydroelectric power plants, diesel generators and wind turbines as they allow direct drive, are easy to control and have high efficiency. A comparison of conventional cylindrical pole synchronous generator designed for low power applications with a permanent magnet synchronous generator in terms of performance has been carried out in a MATLAB/Simulink environment. It has been concluded that output current and voltage of permanent magnet synchronous generator varied depending on the load at the idle running a higher performance would follow as compared to conventional synchronous generators.

1. Giriş

Elektrik generatörleri farklı tiplerde olabilir ancak küçük güçlü ve yüksek devirli bir uygulamada yaygın olarak silindirik kutuplu konvansiyonel senkron generatör ya da sürekli mıknatıslı senkron generatörler kullanılır. Senkron generatörler endüstri akımının frekansı ile orantılı olarak kararlı durum koşulları altında çalışan makinelerdir. Konvansiyonel senkron makinelerde rotor alan sargısına uygulanan DC gerilimle manyetik alan üretilir. Elde edilen manyetik alanın hızı ile içinden doğru akım akan rotor sargılarının dönme hızı eşitlenir. Böylece makine emk endüklenir. Endüklenen faz geriliminin frekansı elektriksel açısal hıza bağlıdır. Rotor hızı uyarım frekansı ile orantılıdır.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörler ise son yıllarda gelişen mıknatıslı teknoloji ile birlikte nispeten düşük maliyetlerine bağlı olarak yaygın kullanım alanı bulmaya başlamışlardır. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin çalışma prensibi konvansiyonel senkron generatörlerle hemen hemen aynıdır. Temel fark SMSG'nin rotorundaki sürekli mıknatıslarla uyarımın sağlanmasıdır.

Bu çalışmada aynı güç değerlerine sahip küçük güçlü silindirik yapıda konvansiyonel senkron generatör ile yüzeye monte edilmiş mıknatıslı rotor yapısına sahip sürekli mıknatıslı senkron generatörün d-q eksen denklemlerine göre oluşturulan modelleri ile simülasyonlar yapılmış ve her iki generatörün güç performansı açısından karşılaştırılmıştır.

2. Senkron Generatörlerin Genel Yapısı

2.1. Konvansiyonel Senkron Generatörlerin Yapısı

Konvansiyonel senkron makinelerin endüstri sargıları, aralarında 120°'lik faz farkı olan üç fazlı sargılardır. Alan sargıları rotor üzerindedir ve bu sargılar DC akımla beslenir. Senkron makinelerin rotoru aslında büyük bir elektromıknatıstır. Uyarım sargılarını taşıdığından dolayı bu kısma endüktör de denir. Rotor yuvarlak veya çukuk

kutuplu tasarlanabilir. Çıkık kutuplu generatörlerin devir sayıları küçük ve kutup sayıları fazladır. Bundan dolayı düşük devirli yerlerde kullanılır. Rotor çapları yüksek, ekstenel boyları kısadır.

Silindirik kutuplu generatörlerin devir sayıları yüksek, kutup sayıları azdır. Bu özelliklerinden dolayı yüksek devirli yerlerde tercih edilir. Rotor çapları küçük, ekstenel boyları uzundur [1].

2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Yapısı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin yapısal olarak konvansiyonel senkron generatörlerden farkı; rotorunda sargılar yerine mıknatısların kullanılıyor olmasıdır. Rotor yapısal olarak içe gömülü mıknatıs ya da rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıslı olarak üretilebilir [2]. Günümüzde çok farklı tasarımlar yapılmakla birlikte; genel olarak yüksek hızlı, küçük güçlü uygulamalarda merkez kaç kuvvetlerin etkisini azaltabilmek için içe gömülü mıknatıs yapısı tercih edilmektedir. Bu yapıda boyuna eksen(q-ekseni) boyunca manyetik relüktans enine eksen(d-ekseni) boyunca manyetik relüktanstaki daha büyüktür. Bu durumda $L_d < L_q$ olur.

Bu çalışmada kullanılan rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıslı SMSG, aynı rotor uzunluğuna ve çapına sahip rotor içine gömülü mıknatıs yapısındaki SMSG'ye nazaran biraz daha fazla güç sağlayabilir. Rotor yüzeyine monte edilmiş durumda $L_d = L_q$ olur.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörler için sabit hızlı uygulamalarda, generatörün çıkışına uygulanacak seri kapasite grubu ve gerilim regülasyonlu diyot doğrultucular veya dönüştürücüler ile yük beslenebilir. Ancak rüzgar türbinleri gibi bazı uygulamalarda değişken hızlarda çalışma gerekli olabilir. Değişken hızlarda sabit çıkış gerilimi sağlamak amacıyla kapalı çevrim kontrol ve tam statik güç dönüşümü gereklidir [3]. Bu kullanım şekliyle güç elektroniği kontrollü SMSG, yüksek güç yoğunluğu ve düşük kayıp gibi avantajlara sahip olur. Ancak bu uygulamanın istenilen sonucu vermediği bazı uygulamalarda SMSG tasarımında yapılacak olan yapısal çözümler ile uygun gerilim regülasyonu gerçekleştirilebilir.

3. Senkron Generatörün Matematiksel Modeli

3.1. Konvansiyonel Senkron Generatörün Matematiksel Modeli

Senkron makinanın matematiksel modelinde referans sistemin açılal hızı, senkron açılal hıza eşit olarak tanımlanmaktadır.

Generatörün gerilim eşitliği 3-faz stator sisteminde;

$$u_{abc} = -r_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (1)$$

şeklinde dir.

Burada;

U_{abc} = Stator üç faz gerilimi

i_{abc} = Stator üç faz akımı

r_s = Stator sargı direnci

ψ_{abc} = Stator akısı

ifade eder.

Park dönüşümü; 3 faz sabit düzlemini 2 faz rotor düzlemine dönüştürür.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yukarıda verilen dönüşüm matrisi ile denklem (1)'in d-q eksenindeki ifadesi;

$$u_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r - (L_{ls} + L_q) \frac{di_{qs}^r}{dt} - (L_{ls} + L_d) i_{ds}^r \omega_r + L_d i_{fr} \omega_r \quad (3)$$

$$u_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - (L_{ls} + L_d) \frac{di_{ds}^r}{dt} + (L_{ls} + L_q) i_{qs}^r \omega_r + L_d \frac{di_{fr}}{dt} \quad (4)$$

şeklinde olur.

Burada;

u_{qs}^r = Rotor düzleminde q-eksen gerilimi

u_{ds}^r = Rotor düzleminde d-eksen gerilimi

i_{qs}^r = Rotor düzleminde q-eksen akımı

i_{ds}^r = Rotor düzleminde d-eksen akımı

L_{ls} = Stator kaçak endüktans

i_{fr} = Rotor uyarma sargısı akımı

ω_r = Rotor açılal hızı

ifade eder.

Uyarım devresi denklemi;

$$u_{fr} = r_r i_{fr} - L_d \frac{di_{qs}^r}{dt} + (L_{lf} + L_d) \frac{di_{fr}}{dt} \quad (5)$$

Burada;

u_{fr} = Rotor uyarma sargısı gerilimi

r_r = Rotor sargı direnci

L_{lf} = Rotor kaçak endüktansı

ifade eder.

Mekanik denklemi;

$$\frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{3P^2}{8J} [L_q i_{qs} i_{ds} - L_d i_{qs} (i_{ds} - i_{fr})] - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{P}{2J} T_e \quad (6)$$

şeklindedir. Burada;

P = Kutup sayısı

B_m = Viskos sürtünme katsayısı

J = Atalet momenti

T_e = Elektromanyetik momenti

ifade eder.

3.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Matematiksel Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün 3-faz stator sisteminde gerilim eşitliği;

$$u_{abc} = -r_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (7)$$

şeklindedir.

3 faz eksen sisteminden 2 faz eksen sistemine dönüşüm dikkate alınarak stator akısı bileşenleri, endüktanslar ve mıknatıs akısı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir [4].

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d + L_{aa}(\theta_r) & L_{ab}(\theta_r) & L_{ca}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) & L_d + L_{bb}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) \\ L_{bc}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) & L_d + L_{cc}(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{ma}(\theta_r) \\ \psi_{mb}(\theta_r) \\ \psi_{mc}(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada;

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} = a,b ve c fazına ait stator öz endüktansı

L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} = a,b ve c fazına ait stator karşıt endüktansı

$\psi_{ma}, \psi_{mb}, \psi_{mc}$ = Rotor mıknatıs akısını ifade eder.

Statorun öz ve karşıt endüktansları sadece dağıtılmış sargılı içe gömülü mıknatıs yapısına sahip makinalarda θ_r açısına sinüzoidal olarak bağlıdır. Rotor yüzeyine monte edilmiş sürekli mıknatıslı makinalarda stator endüktansları θ_r 'den bağımsızdır. Dağıtılmamış sargılar için, stator öz endüktansı ve karşıt endüktanslar benzer şekilde elde edilebilir. Fakat değerleri, dağıtılmış sargılı eşdeğer makinadan daha büyük olur [5]. Denklem (7)'ye Park dönüşümü uygulandığında aşağıdaki ifadeler elde edilir [6].

$$-i_{ds}^r r_s - u_{ds} = -L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \quad (9)$$

$$-i_{qs}^r r_s - u_{qs} = -L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_d i_{ds} + \psi_m) \quad (10)$$

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2} \bar{L}_m \quad (11)$$

$$L_q = L_{ls} + \frac{3}{2} \bar{L}_m \quad (12)$$

olduğuna göre denklem (9) ve (10) düzenlenirse;

$$\frac{di_{ds}^r}{dt} = -\frac{r_s + R_L}{L_{ls} + \frac{3}{2} \bar{L}_m} i_{ds} + \frac{P}{2} i_{qs} \omega_r \quad (13)$$

$$\frac{di_{qs}^r}{dt} = -\frac{r_s + R_L}{L_{ls} + \frac{3}{2} \bar{L}_m} i_{qs} + \frac{\psi_m}{L_{ls} + \frac{3}{2} \bar{L}_m} \frac{P}{2} \omega_r - \frac{P}{2} i_{ds} \omega_r \quad (14)$$

elde edilir.

Burada;

R_L = Faz yükü direnci

\bar{L}_m = Manyetik endüktansların ortalaması

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün hareket denklemi;

$$\frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{3P\psi_m}{4J} i_{qs} - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_e \quad (15)$$

şeklindedir.

temel akı denklemleri ise,

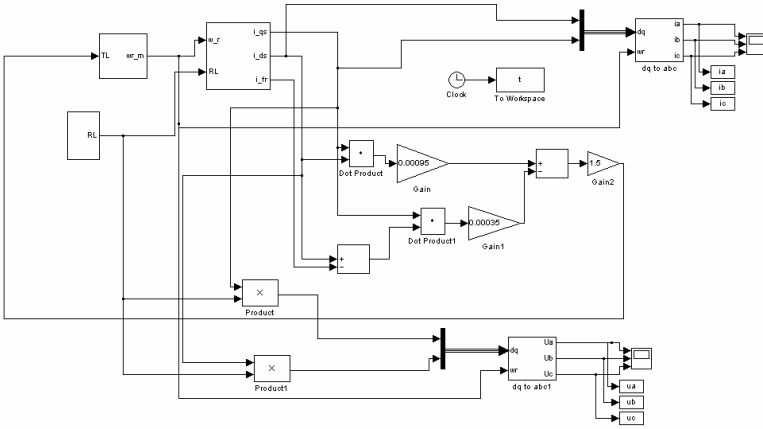
$$\bar{\psi}_s = \psi_{ds} + j\psi_{qs} \quad (16)$$

$$\psi_{ds} = \psi_m + L_{ds} i_{ds} \quad (17)$$

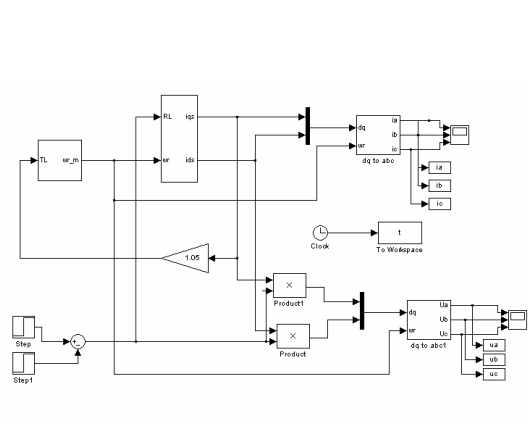
$$\psi_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (18)$$

Her iki makinanın d-q modeli denklemleri yukarıda verilmiştir. Bu denklemlere göre $2p=2$, $P_n=2.5kW$, $I_n=10A$, $U_n=150V$, $\psi_M=0.6$, $R_s=0.5\Omega$, $L_{sd}=95mH$, $L_{sq}=95mH$, $J=0.0075kgm^2$ $B_m=0.00006$ parametrelerine sahip konvansiyonel ve sürekli mıknatıslı senkron generatörler için yapılmış simülasyon diyagramları aşağıdadır.

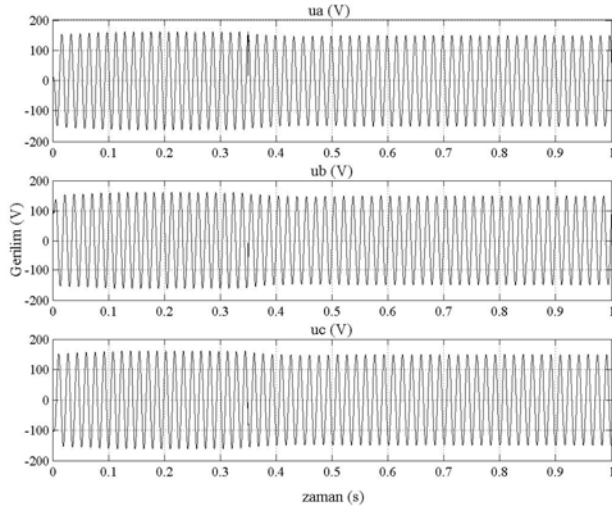
4. Simülasyon Diyagramları ve Grafikler



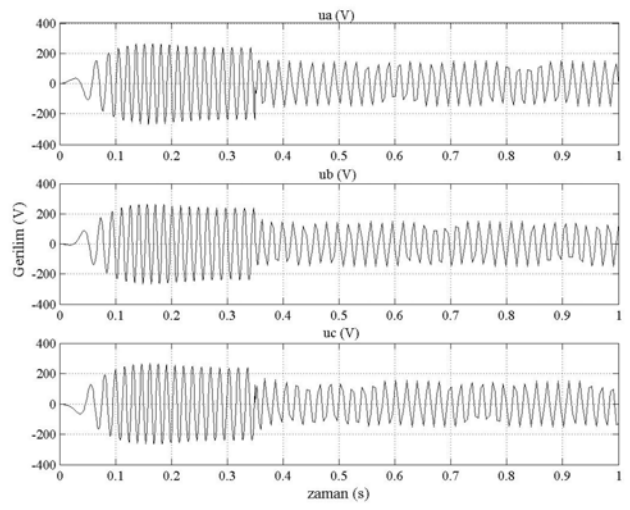
Şekil 3: Konvansiyonel senkron generatörün d-q eksen modeli simulink diyagramı



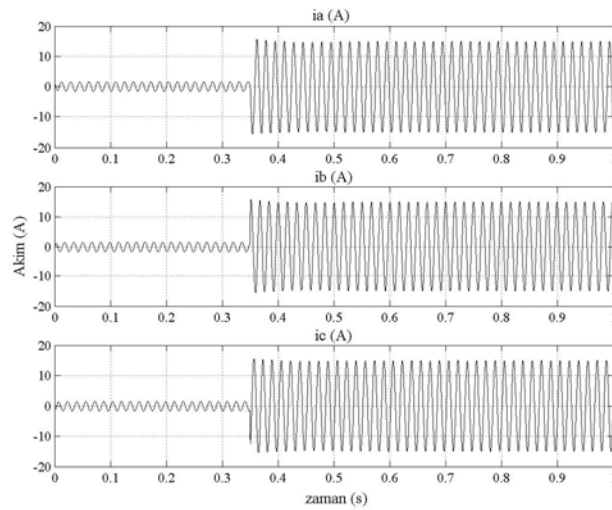
Şekil 6: Sürekli mıknatıslı senkron generatörün d-q eksen modeli simulink diyagramı



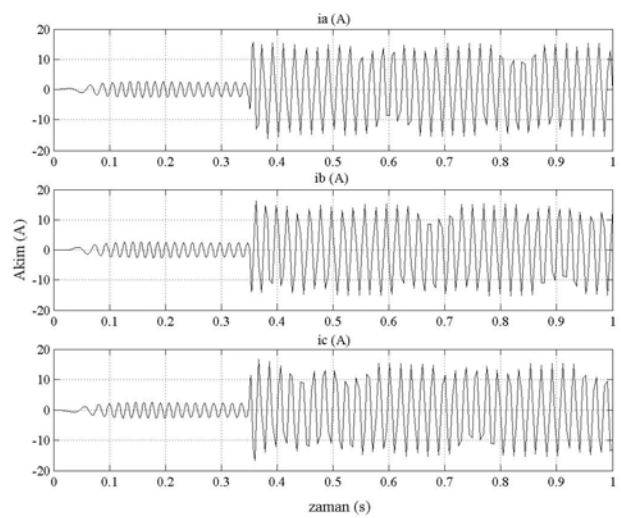
Şekil 4: Konvansiyonel senkron generatörün 3-faz gerilim çıkışı



Şekil 7: Sürekli mıknatıslı senkron generatörün 3-faz gerilim çıkışı



Şekil 5: Konvansiyonel senkron generatörün 3-faz akım çıkışı



Şekil 8: Sürekli mıknatıslı senkron generatörün 3-faz akım çıkışı

5. Sonuçlar

Simulasyon sonuçlarından görüldüğü gibi sürekli mıknaatıslı senkron generatörde mıknaatısların oluşturduğ uyarma alanına bağlı olarak endüklenen gerilimin; boşta çalışma esnasında ($t=0$ ve $t=0.35s$) aralığında yaklaşık 200V olduğ, ancak yükün eklendiği an olan 0.35s'de azalarak 150V seviyelerine düştüğü ve bu esnada üretilen akımın artarak 15A'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Konvansiyonel senkron generatörde gerilim değerini 150V seviyelerinden 140V seviyelerine düştüğü grlmştir. Akımın yine 15A mertebelerine kadar yükseldiği grlmştir.

Bu gözlemler sonucu SMSG'nin ve konvansiyonel senkron generatörün çıkış akımı ve gerilimlerinin yüke bağlı olarak değerliği ve yükün sürekli devrede olması durumunda SMSG'nin konvansiyonel senkron generatöre göre daha yüksek performans sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Her iki makine için akım ve gerilim değerleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde aradaki farkın SMSG'nin kayıplarının az olmasından dolayı gerçekleştiği grlmştir. Ancak SMSG için çıkış değerliğileri konvansiyonel senkron generatörlere göre nispeten daha dalgalıdır. Bunun için yükseltici tip dönüştürücü, şebeke denetimli dönüştürücü gibi değerliği güç elektroniği kontrol stratejileri kullanılabilir.

6. Kaynaklar

- [1] Chapman, S., *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, Newyork, 2004.
- [2] Elsegui, M. ve Fontn, L. "Analytical design of syhronous permanent magnet motor/generator", IEEE, 1165–1170, 2007
- [3] Boldea, I. ve Nasar, S.A., *Electric Drives*, Taylor&Francis Group LLC, Florida, 2006.
- [4] Boldea, I., *Variable Speed Generator*, Taylor&Francis Group LLC, Florida, 2006.
- [5] Mun Ong, C., *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998.
- [6] Lyshevski, S., *Electromechanical Systems, Electric Machines and Applied Mechatronics*, CRC Press, 1999.