

Solar Pompa Sistemleri için Senkron Relüktans Motor Tasarımı

Ömür AYDOĞMUŞ

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Elazığ
oaydogmus@firat.edu.tr

(Geliş/Received:01.09.2016; Kabul/Accepted:23.11.2016)

Özet

Bu makalede; panellerin ürettiği gerilim seviyesine uygun, düşük gerilimle su altında çalışabilen pompa motoru olarak yüksek veriminden ve üstün performansından dolayı Senkron Relüktans Motor (SynRM) yapısı tasarlanmıştır. SynRM rotorunda mıknatıs ve sargı bulundurmadığından dolayı diğer motorlarla kıyaslandığında rotorun üretim maliyetleri ve sağlamlığı çok daha yüksek olacaktır. Ayrıca bu motorlar hızdan bağımsız olarak hemen hemen sabit verim ve momente sahiptirler. Bu motorlar senkron motor olduklarından dolayı sürücüsü birlikte rotor konum bilgisine de ihtiyaç duyarlar. Motor sürücüsü motorun sürekli olarak maksimum hızda çalışmasını sağlayacak şekilde MPPT algoritması geliştirilmiştir. Böylece daha verimli, daha kompakt ve kullanım kolaylığı sağlayan bir solar-pompa sistemi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji Kaynağı, AC Sürücü, Maksimum Güç Noktası İzleme, Senkron Relüktans Motor

Design of a Synchronous Reluctance Motor for Solar Pump Systems

Abstract

In this paper, pump motor which can operate under water with the low voltage level generated by the panel has been designed as Synchronous Reluctance Motor (SynRM) because SynRM has high efficiency and superior performance. Because SynRM does not have magnet and winding on its rotor, manufacture costs and durable of SynRM rotor will be very more superior compared to other motors. Also, these motors almost have constant efficiency and torque independently from the speed. Because SynRM is a synchronous motor, they need an AC drive with rotor-position information. The motor drive has been designed MPPT algorithm to obtain continuously maximum speed. Thus, a solar-pump system having more efficiency, more compact and user friendly have been obtained.

Keywords: Renewable Energy Source, AC Drive, Maximum Power Point Tracing, Synchronous Reluctance Motor

1. Giriş

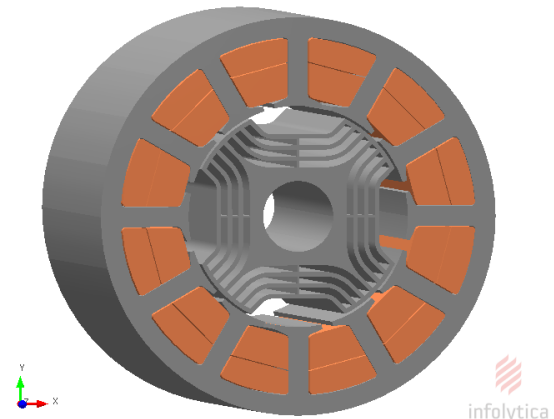
Günümüzde küresel ısınma ve enerji politikası uluslararası alanda önemli bir sorun olmaya başlamıştır. Sera gaz emilimi gelişmiş ülkeler tarafından azaltılmaya çalışılmaktadır. Örneğin Avrupa Birliği sera gazı emilimi seviyesini azaltmayı amaçlamıştır. Ek olarak 2020'ye kadar enerji tüketiminin %20'den daha fazlası yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmeyi amaçlamışlardır. Fotovoltaik (PV) sistem sera gaz emilimi olmaksızın elektrik enerjisi üretebildiğinden dolayı önemli bir yenilenebilir kaynak olmaya başlamıştır[1-2]. Ek olarak PV paneller elektrik kaynağından uzakta olan yerler için uygun bir çözümdür. PV güç istasyonlarının verimi, PV panelin verimi, eviricinin verimi ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)'nin verimi gibi üç faktöre bağlıdır[3]. Verim hem

teknolojik imkânlarla hem de yüksek maliyetli cihazlara gereksinim duyduğundan dolayı PV panel ve eviriciden yüksek verim elde etmek kolay değildir. PV panel dizileri sadece bir maksimum nokta ile birlikte lineer olmayan bir gerilim-akım eğrisine sahip olduğundan dolayı MPPT algoritmaları PV sistemlerde mutlaka kullanılması gerekir. Bu maksimum noktanın yeri ışınım koşullarına ve panel sıcaklığına bağlıdır. Işınım koşulları hava şartlarına bağlı olarak çok hızlı bir şekilde değişir. MPPT arzu edilen maksimum gücü elde etmek için önemli bir parametredir. Literatürde yaklaşık olarak 20 farklı MPPT algoritması mevcuttur[4]. Bu algoritmalar; algılayıcı, maliyet ve verim gibi bazı farklılıklara sahiptirler. Değişir ve Gözetle (P&O) ve Artımsal İletkenlik (InCond) en yaygın tercih edilen MPPT algoritmalarıdır. Bu algoritmalar dışında yapay sinir ağları, bulanık mantık, kesirli

açık devre gerilimi veya kısa devre akımı ve akım süpürme gibi MPPT algoritmaları da vardır[5-10]. Elektrik motorları toplam elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %50'sini tüketir. Özellikle fan, pompa ve kompresör motorları motorların tükettiği enerjinin yarısından fazlasını oluşturur[11]. Motor uygulamalarının çoğunda yaygın olarak 3 fazlı asenkron motorlar kullanılır. Bu yüzden asenkron motorların verimini arttırmak için çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Redüktör ve/veya kayış-kasnak sistemleri düşük hız bölgesinde asenkron motorlardan yüksek moment elde etmek için yaygın olarak kullanılır. Fakat bu sistemler yüksek sürtünmeden dolayı düşük verime sahiptirler. Geçmişte düşük hız-yüksek moment uygulamalarında DC motorlar tercih edilmektedir. Fırçasız DC (BLDC) motor ve kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) 1980'lerden beri tercih edilmektedir. Bu motorlar rotor sargısına ve fırça-kollektöre ihtiyaç duymazlar. Ayrıca yüksek performans, düşük hacim ve yüksek verim gibi avantajlara sahiptirler ve senkron motor grubuna girerler. Son zamanlarda ise senkron relüktans motorlar (SynRM)'a olan ilgi artmıştır. Çünkü bu motorlar diğer AC motorlardaki gibi rotorlarında sargı ve mıknatısa ihtiyaç duymazlar. Böylece daha sağlam ve daha ucuz bir rotor yapısı elde edilebilir. İlk olarak relüktans motor kavramı Kostko tarafından sunulmuştur[12, 13]. SynRM gelişen güç elektroniği sürücü sistemleri ve geri besleme kontrol algoritmaları sayesinde oldukça popüler hale gelmiştir. SynRM'nin verimi ve moment kapasitesi motor tasarım programları sayesinde optimum hale getirilebilmiştir. Günümüzde modern SynRM'ler aynı büyüklükteki asenkron motorlardan yaklaşık %20 daha fazla moment üretebilir[14]. Ayrıca SynRM'ler aynı stator akımı için asenkron motorlara göre daha düşük güç kaybı ve daha yüksek momente sahiptirler. SynRM'nin hem performansı hem de verimi bir frekans dönüştürücü yardımı ile artırılabilir. Bu çalışmada, düşük gerilim seviyesi üreten PV panel ile doğrudan bağlantılı bir pompa motoru tasarlanmıştır. Motor sürücüsünden sürekli olarak maksimum hız elde etmek için bir MPPT algoritması düzenlenmiştir. Önerilen pompa sisteminde yükseltici-çevirici, şarj yönetim sistemi ve akü olmaksızın sonar panel, motor ve sürücüdendir oluşmaktadır.

2. SynRM Tasarımı

Çıkıntı oranı $\xi = L_d/L_q$ SynRM'nin performansı üzerinde önemli bir role sahiptir. Yüksek L_d ve düşük L_q elde etmek için Şekil 1'de gösterildiği gibi q-ekseni üzerine bariyerler yerleştirilmelidir[15]. Stator dış çapı 90mm, stator iç çapı 50mm, oluk derinliği 15.5mm, paket boyu 100mm ve mil çapı 16mm olarak belirlenmiştir. Stator A fazı sarmı (1-4), (7-4), (7-10), (1-10) adım aralıklı 7 sipir olarak tasarlanmıştır. Laminasyon sacı malzemesi M530-50A olarak seçilmiştir.



Şekil 1. SynRM rotor ve stator yapısı

Üretilen momentin kuvveti çıkıntı oranına doğrudan bağlıdır. Denklem 1'de moment ifadesi verilmiştir[16]. Burada λ_{ds} ve λ_{qs} d ve q eksen akılarıdır. dq stator akımları i_{ds} and i_{qs} . P kutup sayısı, L_{ds} ve L_{qs} stator indüktanslarıdır.

$$T = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (1)$$

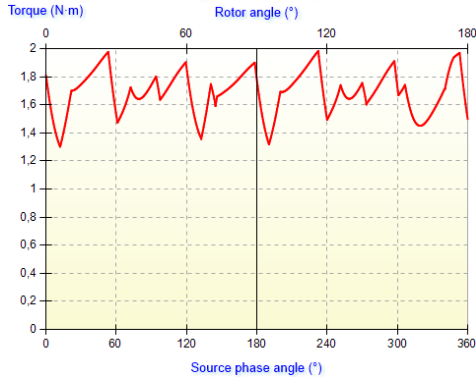
$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} \quad (2)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (3)$$

Bu çalışmada, motor tasarım programı olarak MotorSolve/Infolytica kullanılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi 12 oluklu stator ve 3 bariyerli rotora sahip bir SynRM tasarlanmıştır. L_d indüktans değerini arttırmak ve L_q indüktans değerini azaltmak için bariyerlerin yanı sıra rotor yapısında kullanılan laminasyon saclarına çentikler açılmıştır. Böylece arzu edilen relüktans motor elde edilebilir.

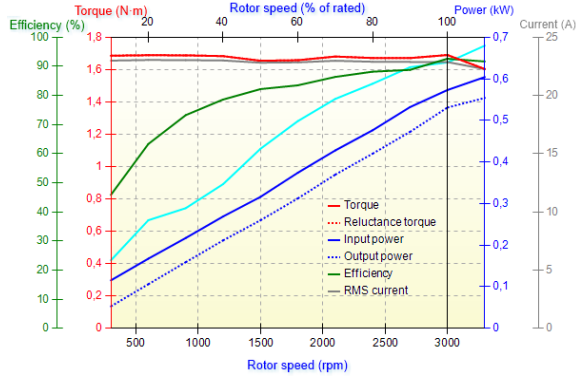
Şekil 2'de tasarlanan SynRM'nin bir turda ürettiği momentin salınım grafiği verilmiştir. Motorun ürettiği nominal moment değeri yaklaşık

1.7 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Motor momentinin bir tur için değişimi

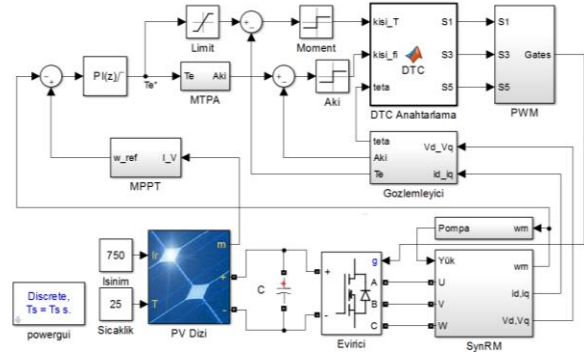
Tasarlanan motorun verimi, momenti, giriş-çıkış güçleri ve etkin akımı değerlerinin hızla göre değişim grafiği Şekil 3'te sunulmuştur. Motor nominal hıza ulaştığında yaklaşık %90'luk bir verime sahiptir. Motorun ürettiği moment tüm hız değerlerinde beklenildiği gibi sabit değerde kalmıştır.



Şekil 3. Tasarlanan motorun performans eğrileri

3. Benzetim Sonuçları

Solar panelin ürettiği DC gerilimin SynRM'ye bağlanabilmesi için 3-faz geriliminin üretilmesi gerekmektedir. Sistemde iki adet paralel PV panel, evirici ve SynRM kullanılmıştır. Ayrıca SynRM'nin kontörü Direct Torque Control - Doğrudan Moment Kontrolü (DTC) algoritması ile sağlanmıştır. MPPT algoritması sayesinde motorun hız referans değeri belirlenmektedir. Sisteme ait benzetim şeması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Benzetim sonuçları için MATLAB blokları

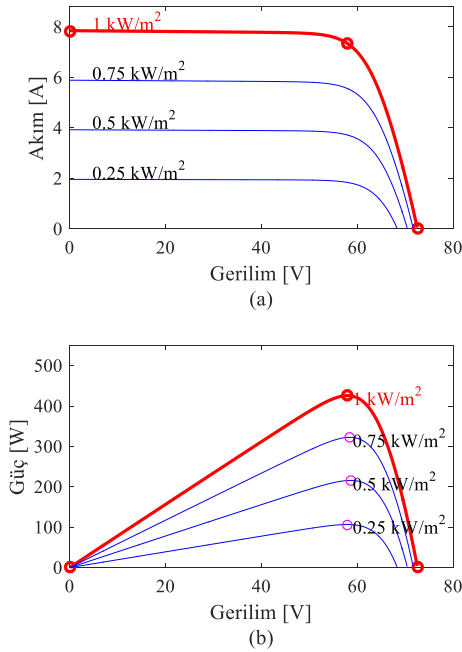
Burada, önce PV panel akım ve gerilim değerleri okunarak maksimum güç noktası tespit edilmektedir. Daha sonra motor bir rampa fonksiyonu ile hızlandırılmaktadır. Referans hız değeri bir PI hız kontrolörü yardımı ile kontrol edilmektedir. PI çıkış sinyali motorun o anda üretmesi gereken moment değerini tespit etmektedir. Arzu edilen moment değeri kullanılarak aşağıdaki formülden arzu edilen akı değeri hesaplanmaktadır.

$$|\lambda_s|^* = \sqrt{\frac{2}{3P} \frac{L_d^2 + L_q^2}{L_d - L_q}} |T_e|^* \quad (4)$$

Elde edilen moment ve akı değerleri gözlemleyici tarafından bulunan moment ve akı değeri ile karşılaştırılarak DTC anahtarlama tablosuna gönderilmektedir [17].

Önerilen sistemde 2 adet paralel 1STH-350WH PV panel kullanılmıştır. Panele ait eğriler 25°C için Şekil 5'te verilmiştir. İki panel birlikte motorun ihtiyaç duyduğu güç değerini üretebilmektedir. Ancak ışınım miktarı düşüktüğü için elde edilen gücün azalmasından dolayı motor hızının da düşürülmesi gerekmektedir. Bundan dolayı sistem sürekli olarak panelin akım ve gerilim değerlerini okuyarak maksimum güç noktasını tespit etmektedir.

Solar Pompa Sistemleri için Senkron Relüktans Motor Tasarımı

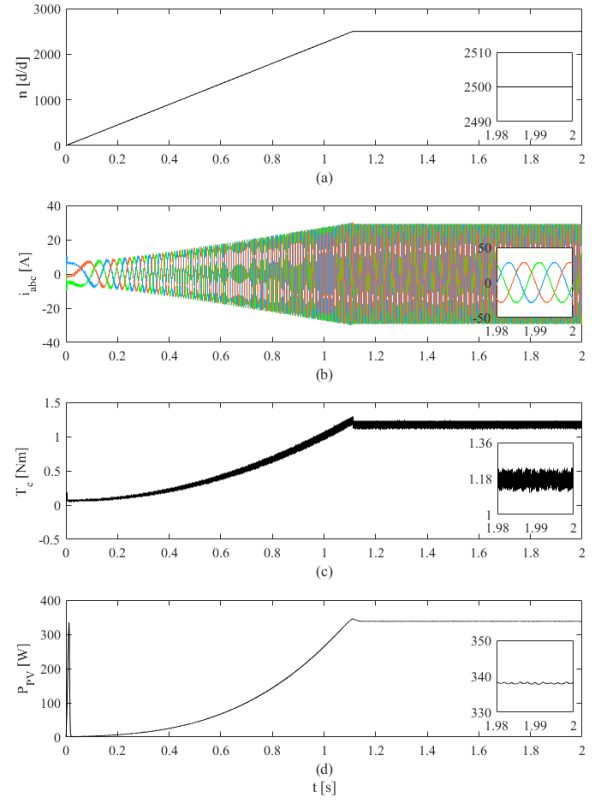


Şekil 5. 2 paralel PV panele ait; (a) Akım-Gerilim (b) Güç-Gerilim eğrileri

Önerilen sistemde motor kalkış akımının yüksek olmasından dolayı referans hız değerine rampa fonksiyonu yardımıyla ulaşılması gerekmektedir. Aksi durumda PV paneller motorun ihtiyaç duyduğu yüksek kalkış akımını sağlayamaz ve çıkış gerilimi sıfır olur. Bu yüzden Şekil 6a'da görüldüğü gibi motor hızı rampa referans değeri ile kontrol edilmiştir. Motorun nominal hızı 3000 d/d olmasına rağmen ışınım miktarı 500 W/m² olmasından dolayı motor ancak 2500 d/d'ya kadar çıkabilmiştir. Bu durumda, motorun ürettiği moment yaklaşık 1.18 N.m'dir. PV paneller 339 W üretebilmektedir ve bu değer üzerine çıkılmasına müsaade edilmemesi gerekmektedir. Işınım miktarının artmasına bağlı olarak PV panel gücü ve motor hız değerlerinin değişimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı ışınım değerlerine ait PV panel gücünün ve motor hızının değişimi

$I_{şınım}$ [W/m ²]	P_{PV} [W]	P_m [W]	n [d/d]
1000	699	670	2950
750	523	510	2850
500	346	339	2500
250	169	163	1900



Şekil 6. (a) Motor hızı, (b) Stator akımları, (c) Moment, (d) PV panel çıkış gücü

4. Sonuç

Bu makalede; güneş enerjisinden faydalanan yüksek verimli bir pompa sistemi sunulmuştur. Pompa sistemlerinde motorun hızı önemli bir parametredir. Çünkü motor hızındaki artış pompa verimini doğrudan etkilemektedir. Pompa sistemleri için kullanılan senkron motorlarda, motorda üretilen manyetik alanın hızı ile rotor açılma hızı arasında kayma oluşmasından dolayı senkron motorlarla kıyaslandığında bu durum büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden önerilen sistemde kullanılan motor diğer AC motorlara rakip olan SynRM olarak belirlenmiştir. Bu sistemin mevcut sisteme olan avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Sistem veriminin artması,
- Stator boyunun azaltılması,
- Rotor elektriksel kayıplarının yok edilmesi,
- Sistemin maliyetinin azaltılması,
- Sistemde kullanılan cihaz sayısının azaltılması (yükseltici çevirici, mıknatıs, akü, şarj sistemi)
- Daha sağlam bir yapının elde edilmesi

Sonuç olarak; bu çalışmada, geleneksel solar-pompa sistemlerinin yerine bir alternatif bir sistem önerilmiştir.

5. Kaynaklar

1. M.H. Rashid, (2001). *Power Electronics Handbook*, Academic Press Series in Engineering, Florida.
2. J. K. Kostko, (1923). 'Polyphase reaction synchronous motors', *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, **42/11**, 1162-1168.
3. T.A.Lipo, , T.J.E. Miller, A. Vagati, I. Boldea, L. Malesani, T.: Fukao, (1994). Synchronous reluctance drives, tutorial presented at IEEE IAS Annual Meeting, Denver, CO.
4. L. Xu, X. Xu, T. A. Lipo, D.W. Novotny, (1991). Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **27/5**, 977-987.
5. J. Lee, Y.S. Kim, (2016). Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation system with a switched mode rectifier', *IET Renewable Power Generation*, **10/2**, 194-202.
6. Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli M, (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **20**, 963-973.
7. E. Deniz, (2016). ANN-based MPPT algorithm for solar PMSM drive system fed by direct-connected PV array, *Neural Computing and Applications*, doi:10.1007/s00521-016-2326-4
8. Zhang L, Al-Amoudi A, Bai Y (2000). Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems. In: Eighth international conference on power electronics variable speed drives, London, UK, 124–129.
9. Hua CC, Lin JR (2001). Fully digital control of distributed photovoltaic power systems. *IEEE international symposium on industrial electronics*. Pusan, Korea, 1–6.
10. Chomsuwan K, Prisuwan P, Monyakul V (2002). Photovoltaic grid connected inverter using two-switch buck-boost converter. In: *IEEE twenty-ninth photovoltaic specialists conference*, New Orleans, Louisiana, USA, 1527–1530.
11. O. Aydogmus, (2012). Design of a solar motor drive system fed by a direct-connected photovoltaic array, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, **12**, 53-58.
12. D.J.C. MacKay, (2009). *Sustainable Energy - Without the Hot Air*, UIT Cambridge.
13. International Energy Agency, (2010). Trends in photovoltaic applications, Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2009 (IEA-PVPS Task 1 T1-19, 2010)
14. T.A. Lipo, (1991). Synchronous reluctance machines - a viable alternative for AC drives, *Electric Machines and Power Systems*, **19**, 659-671.
15. K.H., Hussein, I., Muta, T. Hoshino, M. Osakada, (1995), Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric condition, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 59-64
16. A. Vagati, A.Fratta, G. Franceschini, P. Rosso, (1996). AC motors for highperformance drives: a design - based comparison, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32/5**, 1211-1219.
17. X. Zhang, G. H. B. Foo, (2016). A Robust Field-Weakening Algorithm Based on Duty Ratio Regulation for Direct Torque Controlled Synchronous Reluctance Motor', *IEEE Transactions on Mechatronics*, **21/2**, 765-773.