

Eksenel Akılı Melez Uyarımlı Senkron Makineler

Axial Flux Hybrid Excitation Synchronous Machines

Emin YILDIRIZ¹, Güven ÖNBİLGİN²

¹Sivas Meslek YÜKSEKOKULU
Cumhuriyet Üniversitesi
eyildiriz@cumhuriyet.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
gonbilgi@omu.edu.tr

Özet

Melez uyarımlı senkron makineler (MUSM) akı denetim üstünlüğüyle, yel türbinlerindeki hız ve yük değişimlerinde çıkış gerilimini denetleyebilirler. Yazındaki MUSM modellerin çoğu çapsal akılıdır ancak, eksenel akılı makine yapıları; yüksek verim, güç/tork yoğunluğu, düşük gürültü ve titreşim gibi özellikleri ile küçük güçlü yel türbinlerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada yazındaki eksenel akılı melez uyarımlı senkron makineler (EAMUSM) incelenmiş ve bazı EAMUSM'lerin, çapsal akılı MUSM'lerin çalışma ilkesini çağrıştırdığı görülmüştür. Bu nedenle çapsal akılı MUSM'lerin eksenel akılı uyarlamaları ile yeni modeller önerilmiştir. Ardından önerilen modeller, üstünlük ve sakıncalarına göre karşılaştırılmıştır.

Abstract

Hybrid Excitation synchronous machines (HESM) can control the output voltage in wind power systems when the wind speed and/or load changes. Most of the HESM configurations in the literature are of radial flux type, but, axial flux machine configurations are used with low power wind turbines, with superior features such as high efficiency, power/torque density, low noise and vibration. In this study, axial flux HESM's in the literature are investigated. It has been observed that a large number of axial flux machines are implied by radial ones. Hence, by utilising adaptations of radial flux HESM's new configurations are proposed. The proposed models are compared to each other regarding the advantages and disadvantages.

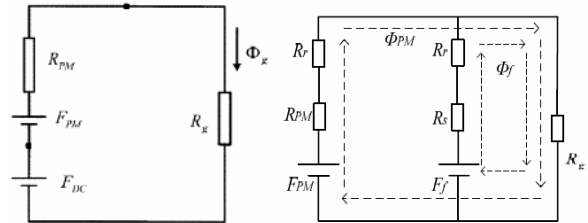
1. Giriş

NdFeB mıknatısların geliştirilmesiyle; daha tıkkız ve verimli, sürekli mıknatıslı (SM) makineler tasarlanmıştır. SM makinede, sürekli mıknatısların özelliğinden dolayı neredeyse değişmez magnetik akı vardır. Bu nedenle; yük ya da hız değiştiğinde, generatörün değişmez çıkış geriliminde çalışması söz konusu olamaz. Bu durum SM senkron

makinelere uygulama alanını kısıtlar. Geniş bir aralıkta değişmez çıkış gerilimi ile çalışmak için, akı denetiminin yapılması gerekir. SM makinelerde ise akı denetimi oldukça karmaşıktır ve mıknatısları ters mıknatıslanmaya götürebilir.

Uyarım sargılı senkron makinelerde, uyarım sargısından geçen akımının değiştirilmesiyle hava aralığı akısının denetimi oldukça kolaydır. Yani SM makinenin sakıncası ortadan kalkar ve küçük uyarım akımlarıyla generatörün çıkış gerilimi denetlenebilir. Ancak, bu tür bir uyarım sargısının kullanılmasında fırça ve bilezik aksamalarının gerekliliği ortaya çıkar. Bu, mekanik ve magnetik kayıpların yanı sıra dizgenin kararlılığını etkiler ve bakım gerekliliğini artırır. Uyarım yükleri de göz önüne alınmalıdır.

Melez Uyarımlı Senkron Makineler (MUSM), SM ve uyarım sargılı makinelerin üstün özelliklerini birleştirme amacından kaynaklanmıştır. Böylece akı denetimi yapabilen sürekli mıknatıslı senkron makineler geliştirilebilmiştir. MUSM ilk kez, 1988'de önerilmiştir, ancak bu makinenin yapısı karmaşıktır ve geniş hava aralığı verimi düşürür.[1]. Yazındaki MUSM'ler, akı kaynaklarının nasıl birleştirildiğine göre seri ve koştur MUSM olmak üzere iki gruba ayrılırlar.



Şekil 1: Seri ve koştur MUSM'in magnetik eşdeğer devreleri

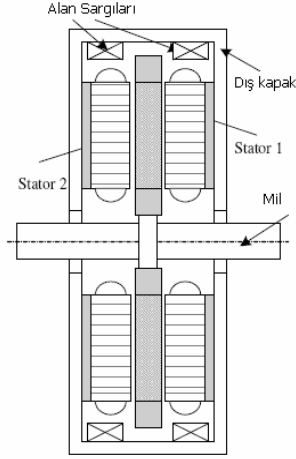
Seri MUSM'lerde uyarım sargıları tarafından oluşturulan akı, sürekli mıknatısların üzerinden geçer. SM'lerin geçirgenlikleri havanın geçirgenliğine çok yakın değerdedir. Yani, uyarım akı yolu relüktansı oldukça yüksektir. Ayrıca, mıknatısların ters mıknatıslanma riski de düşünülmelidir [2-

5]. Koşut MUSM'de, oluşturulan akılar değişik akı yollarından dolaşır. Uyarım sargılarının oluşturduğu akı, sürekli mıknatıslar üzerinden geçmez (Şekil1).

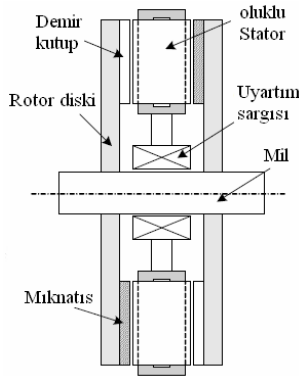
Seri MUSM'lerin yapısı ve yapımı daha yalın ve ucuzdur. Ancak seri MUSM'lerde, uyarım akı yolu relüktansı daha büyük olduğundan, koşut MUSM'lere göre akı denetim yetisi daha azdır. Seri MUSM'in ters mıknatıslanma gibi önemli bir sakıncası da vardır. Ayrıca koşut MUSM'ler, çok daha değişik modeller geliştirmeye açıktır. Bu nedenle koşut ya da bağımsız magnetik devrelerden oluşan yapılar yeğlenmelidir.

2. Eksenel Akılı Melez Uyarımlı Senkron Makineler (EAMUSM)

Yazında önerilen MUSM'lerin çoğu çapsal akılıdır. Eksenel akılı modeller motor çalışmasında akı zayıflatma amaçlı önerilmiştir. Sınırlı biçimde, hava aralığı akısını desteklemek için de kullanılabilir. Bunlardan biri, [6]'da tanıtılan modeldir (Şekil 2). Dış kapaktaki uyarım sargısından geçen akımının yönüne göre, endüvi sargısını halkalayan akı değişmektedir.



Şekil 2: Çift Uyarım sargılı EAMUSM

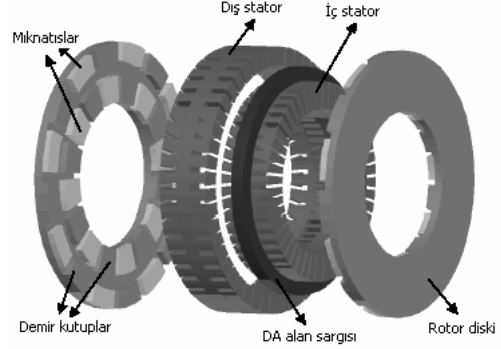


Şekil 3: Ferromagnetik milli EAMUSM

Rotor diskleri ve mili tümüyle ferromagnetik malzemeden olan bir başka modelde, tüm akı yolları mil üzerinden kapanır [7,8]. Her diskte, eksenel yönde magnetik özellik kazanmış mıknatıslar ve demir kutuplar vardır. Demir kutuplar, mili çevreleyecek şekilde statora tutturulmuş uyarım sargısının

oluşturduğu ve düşük relüktanslı mil üzerinden geçen akımın yönüne bağlı olarak mıknatıslanır (Şekil 3).

Geleneksel eksenel akılı SM yapılarına bir ya da iki DA uyarım sargısı ekleyerek, akı denetim yetisi olan yeni eksenel akılı SM makineler önerilebilir [9]. Şekil 4'deki akı denetimli TORUS'ta, iki rotor disk yay biçimli demir parçalar ve mıknatıslardan oluşur [10]. Statorda, oluklu iki parçalı lamine çekirdek ve bunların arasında uyarım sargısı bulunmaktadır. İki takım 3 fazlı AA sargılar, açılan oluklara yerleştirilir.

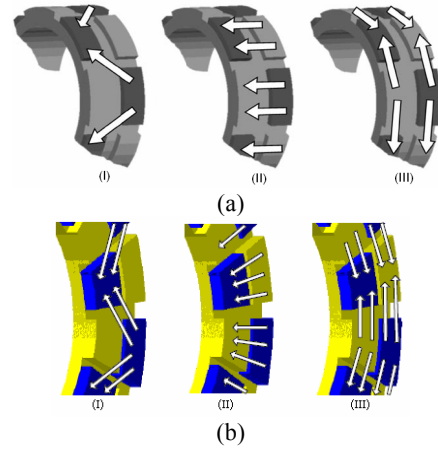


Şekil 4: Akı denetimli TORUS

Yazındaki EAMUSM'ler incelendiğinde; [6]'da önerilen yapının uyarım zayıflatma yetisinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ancak, akı destekleme başarımı sınırlı olacaktır. [8]'deki yapıda, mıknatıs ve uyarım akısı mil üzerinden magnetik devresini tamamlamaktadır. Bu uzun yolda, mil relüktansı düşük olmalıdır. Ayrıca yol uzadıkça kaçak akı da artacaktır. Bu nedenle, güç yoğunluğu yüksek EAMUSM modellerine gerek vardır.

3. Yeni EAMUSM'lerin Geliştirilmesi

Yazındaki çalışmalara bakıldığında, [11]'de önerilen çapsal akılı modelin [10]'da önerilen eksenel akılı yapıyı çağrıştırdığı ve çalışma ilkesinin [12-15]'de açıklandığı görülmektedir. Şekil 5'de çapsal ve eksenel türlerde, akı değişimlerinin benzerliği görülmektedir.



Şekil 5: ÇAMUSM'in (a) ve EAMUSM'in (b), uyarım akımıyla akı dağılımları. $I_u=0$ (I), $I_u<0$ (II) ve $I_u>0$ (III) [10,11]

Bu nedenle, yeni eksenel akılı melez uyartımlı generatör tasarımları geliştirilirken öncelik, çapsal akılı yapılardan eksenel akılı yapıya taşınabilecek özellikleri araştırmak ve bunları sınamak olabilir. Bu amaçla, yazındaki tüm çapsal akılı modeller incelenerek benzer özellikleri taşıyan eksenel akılı uyarılama modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, 5 alt grupta incelenebilir.

3.1. Bilezik ve Fırça Kullanan EAMUSM

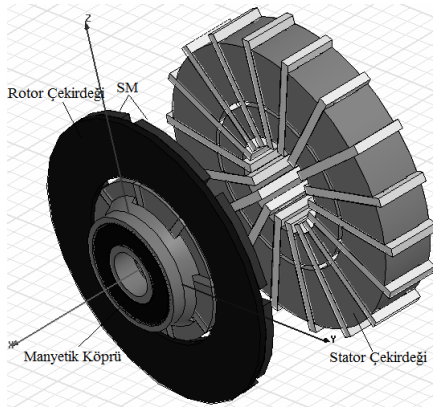
Yazında bilezik ve fırça kullanan pek çok ÇAMUSM yapısı vardır [16-22]. Yapısı yalın, yapımı ve işçiliği kolay olduğundan birçok uygulamada bu tür yapılar yeğlenmiştir. Fırça ve bilezik düzeneği makinenin verimini ve kararlılığını olumsuz etkilemekte ve sık bakım gerektirebilmektedir. Makine tasarımında, fırça ve bilezik düzeneği olmayan yapılandırmalara yönelinmiştir. Bu nedenle bu yapılarda eksenel akılı uyarlamalar incelenmemiştir.

3.2. Rotor Magnetik Akısını Statordaki Uyartım Sargısıyla Denetleyen EAMUSM

Bu yapıda; SM ve uyartım sargılarının yer aldığı akı yolları, birbirinden bağımsızdır ve alan sargısının küçük bir MMK'ı ile hava aralığı akısı kolayca denetlenebilir. Şekil 4'deki modelde, stator çekirdeğinin iç kısmındaki uyartım sargısındaki akımın şiddetine ve yönüne göre endüvi sargılarını halkalayan akı değiştirilmektedir [10,23].

3.3. Magnetik Köprü Kullanan EAMUSM

Son yıllarda ÇAMUSM yapıların çoğunda magnetik köprü düzeneği önerilmektedir [24-35]. Magnetik köprülü düzeneğe; uyartım sargısı bir magnetik köprü içerisine konularak, makinenin yan kapağına tutturulur. Magnetik köprü'nün alt ve üst kısımlarından küçük bir hava aralığı ile ayrılan, kutup ayağı uzatmaları ile bir akı yolu sağlanır. Şekil 6'da bu tür bir EAMUSM görülmektedir. Bunun tek rotor tek stator, iki rotor tek stator, tek rotor iki stator ya da çok katmanlı yapıları olasıdır.



Şekil 6: Magnetik Köprülü EAMUSM

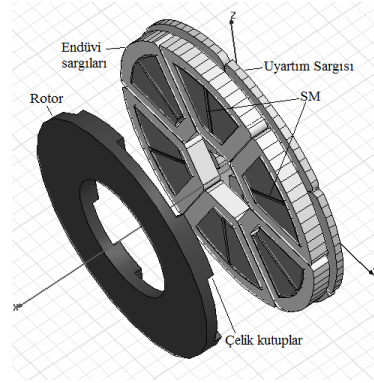
3.4. Uyartım Kaynaklarının Statorda olduğu EAMUSM

Bu model; uyartım kaynakları statorda olduğundan, rotor yalın ve çıkık kutupludur. Bunun bir üstünlüğü, tüm sargılar statorda olduğu için soğutma dizgesi verimliliği artışıdır [36]. Fırça kullanımına gerek yoktur. Şekil 7'de modelin eksenel

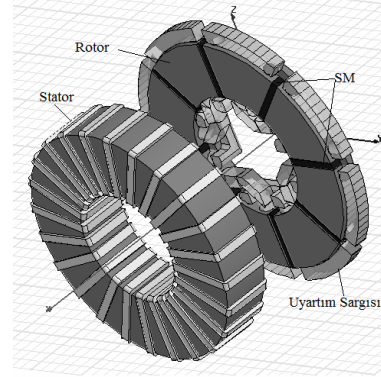
akılı uyarlaması görülmektedir. [37]'de, aynı ilkeye dayanarak H tipi nüvelerden oluşan EAMUSM önerilmiştir.

3.5. İki Düzeyli EAMUSM

[38] ve [39]'da, uyartım sargılarına enerji aktarımı transformatördeki gibi statordan (birincil sargı) sağlanmaktadır. Statordan küçük hava aralığı ile rotorda endüklenen gerilim, doğrultularak uyartım sargısına verilebilir. Şekil 8'de modelin eksenel akılı uyarlaması görülmektedir. Yapının daha iyi görülebilmesi için, uyartım kısmı gösterilmemiştir.



Şekil 7: Uyartım kaynaklarının statorda olduğu EAMUSM



Şekil 8: İki düzeyli EAMUSM

4. EAMUSM'lerin Karşılaştırılması

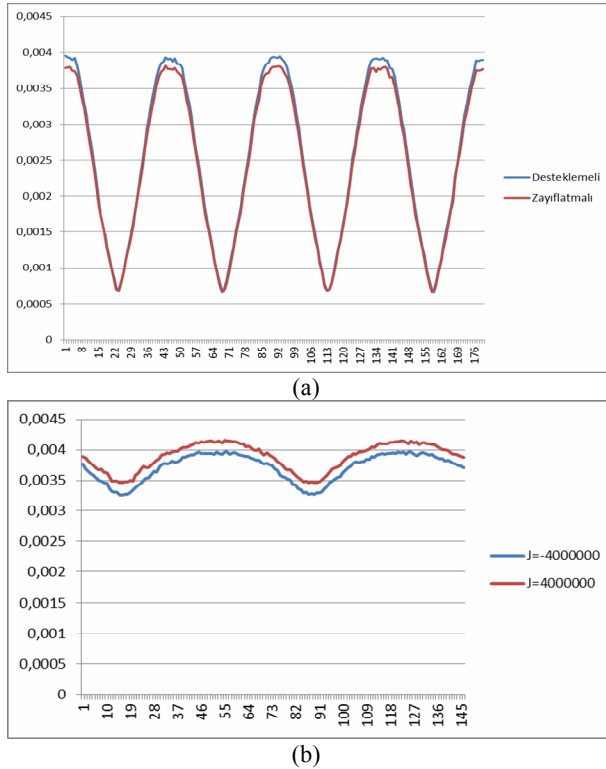
Fırça-bilezik kullanan EAMUSM modeli dışında, sınıflandırılan EAMUSM modellerden ikisi yazında incelenmiştir. Birincisi, rotor akısını statordaki uyartım sargısıyla denetleyen türdür. Burada, uyartım sargısını statora yerleştirmek için stator çekirdeği iki bölüme ayrılmış ve rotor çekirdeğinde kutuplar arasında boşluk bırakılmıştır. Bu, az malzeme kullanımı ve düşük güç yoğunluğu sonucunu doğurur. Bu nedenle yazında, ağırlık açısından uygun olmadığı [40], düşük güç yoğunluğu ve düşük malzeme kullanımı gibi sakıncaları öne sürülmüştür [30]. İkincisi ise uyartımın tümünün statorda olduğu modeldir [37]. Yapının statoru karmaşıktır ve çıkık kutuplarda doyum sorunları olabilir.

Magnetik köprülü modelde; akımla uyartımı sağlayan magnetik köprü'nün akı yolu uzun olduğundan, magnetik kaynakların kullanımı azalmaktadır. Bu da verimi etkiler,

ancak model iç içe geçmiş iki eksenel akılı makine gibi olduğundan toplam güç yoğunluğu artar. Uyarım sargısı akısının ve sürekli mıknatıs akısının, seri ya da koşut değil, birbirinden tümüyle bağımsız olması verimi de artırır [37]. Rotor magnetik akısını statordaki uyarım sargısıyla denetleyen EAMUSM modelinde; elektriksel uyarım yokken yararlı mıknatıs akısı azalır ve kaçak akı artar. Magnetik köprülü EAMUSM modelde ise iki uyarım kaynağının magnetik devresi birbirinden bağımsızdır ve elektriksel uyarım ek bir magnetik kaynak görevi yapar. Yani akı denetimi yapılırken, yararlı mıknatıs akısının miktarı değişmez. Bu da güç yoğunluğunu artırır.

Uyarım kaynaklarının statorda olduğu EAMUSM ve iki düzeyli EAMUSM modellerde mıknatıs akısı, elektriksel akı tarafından stator çekirdeğinden geçmeye ya da geçmemeye (uyarım akımının yönüne bağlı olarak) zorlanır. Bu modellerde daha fazla uyarım kaynağına gereksinim duyulduğundan bakır kullanımı ve sarım işçiliği daha çoktur. Uyarım kaynaklarının statorda olduğu EAMUSM modelinde, rotordaki çelik kutupların alt uçlarında yay çapı küçük olduğundan, daha çabuk doyuma ulaşır. Bu nedenle çok kutuplu yapılmaları uygun olmayabilir. İki düzeyli EAMUSM modelinde uyarıcı düzeneği de olduğundan yapı oldukça karmaşıktır.

Şekil 9'da, önerilen EAMUSM modellerinin birkaçında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan akı değişimleri görülmektedir.



Şekil 9: Çapsal akılı modellerden uyarlanan EAMUSM'lerin hesaplanmış akı değişimleri (a) Magnetik köprülü EAMUSM, (b) Uyarım kaynaklarının statorda olduğu EAMUSM.

5. Sonuçlar

Yel türbinli elektrik enerjisi üretiminde çıkış gerilimini denetleyebilmek için akı denetimi yapabilen, yüksek güç yoğunluklu MUSM'ler kullanılabilir. Yazında önerilen modellerin çoğu çapsal akılıdır ancak, eksenel akılı generatörlerin disk şeklindeki yapıları, yel türbinlerinde mekanik uyum açısından önemlidir. Ayrıca eksenel akılı makinelerin yüksek verim, güç/tork yoğunluğu, düşük gürültü ve titreşim gibi özellikleri vardır. Çok kutuplu olarak yapılabildikleri için, yel türbinlerine dişli kutusuz bağlanabilirler. Bu nedenle EAMUSM'ler geliştirilmesi güncel ve gereklidir.

Akı denetimli TORUS incelendiğinde [10], çalışma ilkesinin yazındaki ÇAMUSM'lere benzediği görülmektedir. Bu gerçekte, yazındaki ÇAMUSM modeller incelenmiş ve bunların eksenel yapıya uyarlanabilen modelleri 5 gruba ayırmıştır. Bu modellerden magnetik köprülü EAMUSM modeli, yapılan hesaplamalara dayanılarak, akı denetim yetisi ve yüksek güç yoğunluğu özellikleriyle öne çıkmaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] Yiping, D., "Design Research for Hybrid Excitation Synchronous Generator", *Nanjing Üniversitesi, Doktora Tezi*, 2002.
- [2] Amara, Y., Vido, L., Gabsi, M., Hoang, E., Hamid Ben Ahmed, A., Lecrivain, M., "Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, pp. 2137-2149, 2009.
- [3] Leonardi, F., Matsuo, T., Li, Y., Lipo, T.A., Mcleer, P.J., "Design Considerations and Test Results for a Doubly Salient PM Motor with Flux Control", *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1, pp. 458-463, 1996.
- [4] Chau, K.T., Li, Y.B., Jiang, J.Z., Niu, S., "Design and Control of a PM Brushless Hybrid Generator for Wind Power Application", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 3497-3499, 2006.
- [5] Li, Y., Lipo, T. A., "A doubly salient permanent magnet motor capable offield weakening", *Power Electronics Specialists Conference, PESC '95 Record, 26th Annual IEEE*, Vol. 1, pp. 565-571, 1995.
- [6] Hsu, J.S., "Direct control of air-gap flux in permanent-magnet machines", *IEEE Transactions on Energy*, vol. 15, pp. 361-365, 2000.
- [7] Eastham, J. F., Evans, P. D., Coles, P. C., Ibrahim, M., "Double disc alternators with hybrid excitation", *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 3039-3041, 1992.
- [8] Brown, N.L., Haydock, L., "New Brushless Synchronous Alternator", *Electric Power Applications, IEEE Proceedings*, vol. 150, pp. 629-635, 2003.
- [9] Lipo, T.A., ve Aydın, M., "Field Weakening of Permanent Magnet Machines – Design Approaches", *EPE Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC'04)*, Riga, Latvia, 2004.
- [10] Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A., "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable

- of Field Control”, *IEEE IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp.1250 -1257, 2002.
- [11] Tapia, J.A., Leonardi, F., Lipo, T.A., “Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine With Extended Field-Weakening Capability”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp.1704-1709,2003.
- [12] Spooner, E., Khatab, S.A.W., Nicolaou, N.G., “Hybird Excitation of AC and DC Machine”, *Electrical Machines and Drives*, pp. 48-52,1989.
- [13] Mizuno, T., Nagayama, K., Ashikaga, T., Kobayashi, T., “Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 117, pp. 110-123,1996.
- [14] Mizuno, T., “Hybrid Excitation Type Permanent Magnet Synchronous Motor”, *United State Patent*, Patent Numarası: 5,682,073, 1997.
- [15] Zhenguang, L., Yanliang, X., Renyuan, T., Yan, H., “3-D Magnetic Field Analysis of a Hybird Excitation Synchronous Generator”, *Electrical Machines and Systems (ICEM 2001)*, vol.1, pp. 164-166, 2001.
- [16] Xiaogang, L., Lipo, T.A., “A Synchronous/Permanent Magnet Hybrid AC Machine”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, pp. 1273-1281, 2000.
- [17] Naoe, N., Fukami, T., “Trial Production of a Hybrid Excitation Type Synchronous Machine”, *Electric Machines and Drive Conference (IEMDC 2001)*, pp. 545-547, 2001.
- [18] Finken, T., Hameyer, K., “Study and Geometry Optimization of Hybrid Excited Synchronous Alternators For Automotive Applications”, *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC '07)*, pp. 124-128, 2007.
- [19] Finken, T., Hameyer, K., “Study of Hybrid Excited Synchronous Alternators for Automotive Applications Using Coupled FE and Circuit Simulations”, *Magnetics*, pp. 1598-1601, 2008.
- [20] Chao-hui, Z., Huangiu, G., Xin-wei, W., “The Study of Structure and Characteristic of a New Type HECPSG”, *Industrial Electronics, (ISIE 2007)*, pp. 1097-1100, 2007.
- [21] Li, W., Huang, S., “Analysis And Design of Hybrid Excitation Claw-Pole Generator”, *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, pp. 680-695, 2011.
- [22] Bolognesi, P., Bruno, O., Papini, F., “Analysis of a Hybrid Excitation DC Motor”, *Electrical Machines, ICEM 2008*, pp. 1-6, 2008.
- [23] Aydin, M., Lipo, T.A., Huang, S., *United States Patent*, Patent Numarası: 7,608,965 B2, 2009.
- [24] Yiping, D., Haizhen, C., “A Design Research for Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS 2001)*, vol. 2, pp. 856-859, 2001.
- [25] Feng, Y.C., Yun, L.H., Ping, L.X., Hua, F.S., Jian, G., “Electromagnetic Design of Hybrid Excitation Synchronous Machine With Asymmetrically Stagger Permanent Magnet”, *Electrical Machines and Systems (ICEM 2007)*, pp. 1617-1622, 2007.
- [26] Chengfeng, Y., Heyun, L., Xiping, L., Shuhua, F., Jian, G., “Analysis and Experimental Investigation for Field Control Capability of a Novel Hybrid Excitation Claw-Pole Synchronous Machine”, *Power Electronics and Drive Systems PEDS'07*, pp. 196-201, 2007.
- [27] Chengfeng, Y., Heyun, L., Jian, G., Zhu, Z.Q., “Design and Analysis of a Novel Hybrid Excitation Synchronous Machine with Asymmetrically Stagger Permanent Magnet”, *Transaction and Magnetics*, vol. 44, pp. 4353-4356, 2008.
- [28] Xiping, L., Heyun, L., Zhu, Z.Q., Chengfeng, Y., Shuhua, F., Guo, J., “A Novel Dual-Stator Hybrid Excited Synchronous Wind Generator”, *Transaction and Industry Applications*, Vol. 45, pp. 947-953, 2009.
- [29] Xinghe, F., Jibin, Z., “Numerical Analysis on the Magnetic Field of Hybrid Exciting Synchronous Generator”, *Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 4590-4593, 2009.
- [30] Jibin, Z., Xinghe, F., “Study on the Structure and Flux Regulation Performance of a Novel Hybrid Excitation Synchronous Generator”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008)*, pp. 3549-3553, 2008.
- [31] Jibin, Z., Xinghe, F., “Influence of the Axial-Length Ratio of Permanent Magnet to Homopolar Induction on the Performance of Hybrid Excitation Synchronous Generator”, *Transactions on Plasma Science*, vol. 39, pp. 368-373, 2011.
- [32] Xinghe, F., Jibin, Z., “Design and Analysis of a Novel Hybrid Excitation Synchronous Generator”, *Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008)*, pp. 2074-2077, 2008.
- [33] Zhang, Z., Yan, Y., Yang, S., Bo, Z., “Principle of Operation and Feature Investigation of a New Topology of Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, 2174-2180, 2008.
- [34] Zhao, C., Luo, F., “No-Load Trait Analysis on Radial Structure HESM of Magnetic Shunt Type”, *Industrial Technology (ICIT'08)*, pp. 1-6, 2008.
- [35] Zhao, C., “The Reseach of Radial Structure HESM of Magnetic Shunt Type”, *International symposium on Industial electronics*, pp. 2103-2108, 2009.
- [36] Hoang, E., Lecrivain, M., Hlioui, S., Gabsi, M., “Hybrid Excitation Synchronous Permanent Magnets Synchronous Machines Optimally Designed for Hybrid and Full Electrical Vehicle”, *8th. International Conference of Power Electronics*, pp. 153-160, 2011.
- [37] Liu, X., Wang, C., Zheng, A., “Operation Principle and Topology Structures of Axial Flux-Switching Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-7, 2011.
- [38] Shushu, Z., Chuang, L., Xu, Y., Yundong, M., “Desing And Experimental Study of a Novel Two-Stage Brushless Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *International Conference on Renewable Energies And Power Quality (ICREPQ'11)*, 2010.
- [39] Shushu, Z., Chuang, L., Xu, Y., Zhou, X., “Characteristics and Experimental Study on a Novel Tangential/Radial Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG 2010)*, pp. 883-886, 2010.
- [40] Zhao, C.H., ve Yan, Y.G., “A Review of Development of Hybrid Excitation Synchronous Machine”, *Industrial Electronics (ISIE '05)*, vol. 2, pp.857 -862, 2005.