



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Standart santrifüj pompaların şebekeden bağımsız jeneratör olarak kullanımını ve performans incelemesi

Usage of standard centrifugal pumps as an off-grid generator and performance analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Osman Fırat ALKAN¹, Sibel AKKAYA OY²

ORCID¹: 0000-0002-7704-8796

ORCID²: 0000-0002-1209-920X

To cite to this article: Alkan O.F., Akkaya Oy S. “Standart santrifüj pompaların şebekeden bağımsız jeneratör olarak kullanımını ve performans incelemesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(3): 1091-1102, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Alkan O.F., Akkaya Oy S. “Standart santrifüj pompaların şebekeden bağımsız jeneratör olarak kullanımını ve performans incelemesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1091-1102, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.905717

Standart Santrifüj Pompaların Şebekeden Bağımsız Jeneratör Olarak Kullanımı ve Performans İncelemesi

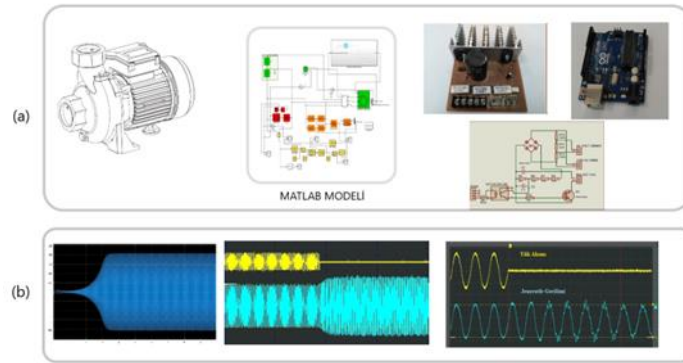
Usage of Standard Centrifugal Pumps as an Off-Grid Generator and Performance Analysis

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Standart santrifüj pompaların elektrik üretiminde kullanımı / Using standard centrifugal pumps in electricity generation
- ❖ Kontrol kartı performansının incelenmesi / Examination of control card performance

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Standart santrifüj pompa-motor setinin türbin-jeneratör olarak kullanılırken, değişken yük koşullarındaki performansının uygun fiyatlı bir kontrol kartı ile artırılması sağlanmıştır / While the standard centrifugal pump-motor set is used as a turbine-generator, its performance under variable load conditions is increased with an affordable control card



Şekil. 1 Sistem tasarımı (a), Performans testleri (b) /Figure. 1 System design (a), Performance tests (b)

Amaç (Aim)

Standart santrifüj pompaları şebekeden bağımsız enerji üretiminde kullanılabilir bir tercih haline getirebilmek / Making standard centrifugal pumps a usable choice for off-grid power generation.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

MATLAB programı ile sistem tasarımı ve fonksiyon testleri yapıldıktan sonra fiziksel tasarım oluşturularak performans testleri gerçekleştirilmiştir./ After the system design and function tests were done with the MATLAB program, and then the physical design was created and performance tests were implemented.

Özgünlük (Originality)

Maliyet etkin tasarlanan ve fiyatı belirlenen kontrol kartının türbin jeneratör ile birlikte performansı test edilmiştir./ The cost-effectively designed control card price has determined and performance tests has been done together with the turbine generator.

Bulgular (Findings)

Santrifüj pompa-motor setinin ekonomik kontrol kartı tasarımı ile kabul edilebilir performansa ulaştığı sonucuna ulaşılmıştır./ It was concluded that the set reached acceptable performance with its economical control card design

Sonuç (Conclusion)

Sistem performansında iyileşme sağlanmıştır./ System performance has improved.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Standart Santrifüj Pompaların Şebekeden Bağımsız Jeneratör Olarak Kullanımı ve Performans İncelemesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Osman Fırat ALKAN^{1*}, Sibel AKKAYA OY²

¹Ordu, 52000, Türkiye

²Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği, Ordu, 52000, Türkiye,
(Geliş/Received : 30.03.2021 ; Kabul/Accepted : 31.12.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 26.03.2022)

ÖZET

Şebekeden uzak alanlarda ve mikro ölçekte hidrolik kaynağa sahip projelerde sahaya özel tasarım türbin-jeneratör ekipmanı kullanmak yatırım maliyetini yükselterek, erişilebilirliği azaltmaktadır. Sınırlı finansal kaynak ile kullanılabilir performansa sahip elektrik üretilmesi istenilen projeler için bir diğer alternatif de standart santrifüj pompa-motor setinin türbin-jeneratör olarak kullanılmasıdır. Bu çalışma standart santrifüj pompa-motor setinin şebekeden bağımsız türbin-jeneratör olarak ve tek fazlı yükleri beslerken, değişken yük durumlarındaki enerji kalite bozulmasını istenilen sınırlarda tutabilecek ve aynı zamanda düşük maliyet ile kurulabilecek yük kontrol sisteminin tasarlanmasını amaçlamıştır. Çalışmada kolay ikazlanan ve kararlı çalışma avantajı bulunan üç fazlı kendinden ikazlı indüksiyon jeneratörün tek fazlı olarak kullanımını üzerinde yoğunlaşmıştır, böylece yük kontrol sistemindeki eleman sayısı ve maliyet düşürülmüştür. Yük kontrol sistemi parçası balast yükün hesaplanan güçte kararlı şekilde çalışmasını sağlamak için PID algoritması oluşturulmuştur. Ortaya çıkan tasarımın bilgisayar ortamında testi için MATLAB SIMULINK kullanılmıştır. Daha sonra deney seti ortamında kurulan sistemin fiziksel performans testleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları, tasarlanan yük kontrol kartının yük değişimleri esnasında jeneratör çıkış gerilimi frekansındaki değişiminin %16 mertebesinde %1'e, % 34 olan gerilim değişimini %3 mertebesine düşürdüğü, jeneratörün istenilen çıkış voltajı ve frekansında tuttuğunu göstermiştir. Yük atma ve yük alma esnasında yük kontrol kartının tepki süresinin 40 ila 150 ms arasında olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Santrifüj pompa, türbin, asenkron jeneratör, PID.

Usage of Standard Centrifugal Pumps as an Off-Grid Generator and Performance Analysis

ABSTRACT

Using field-specific design turbine-generator equipment in rural areas and projects with hydraulic resources at micro scale reduces accessibility by increasing investment costs. Another alternative for projects that want to generate electricity with usable performance with limited financial resources is to use the standard centrifugal pump-motor set as a turbine-generator. This study aimed to design a load control system that can keep the energy quality deterioration in variable load situations within the desired limits and at the same time be installed with low cost, while the standard centrifugal pump-motor set is independent from the grid as a turbine-generator and feeding single-phase loads. It is focused on the use of a three-phase self-excited induction generator to feed one-phase loads, which has the advantage of easy excitation and stable operation, thus reducing the number and cost of the elements in the load control system. PID algorithm has been created to enable the ballast load of the load control system to a stable operation at the calculated power. MATLAB SIMULINK program was used to test the design in computer environment. Then, the physical performance tests of the system, which was established in the experimental set environment, were also performed. The results of the measurements showed that the designed load control card keeps the generator output voltage and frequency at the desired output voltage and frequency, which reduces the change in the generator output voltage frequency from 16% to 1% and the voltage change from 34% to 3% during load changes. It has been determined that the response time of the load control card is between 40 and 150 ms during load shedding and unloading.

Keywords: Centrifugal pumps, turbine, asynchronous generator, PID.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şehir merkezleri ve yerleşim alanlarından uzaklaştığında enerji kaynaklarına ulaşmak hem zor hem de maliyetli hale gelir. Bu tür uzak noktalarda elektrik kaynağına ulaşmanın yolu ya içten yanmalı motorların tahrik ettiği jeneratörleri kullanmak veya yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından belki en eski ve

bilinen yöntemi ise hidroelektrik jeneratörlerdir. Ancak hidroelektrik kaynaklara ulaşma maliyetinin yüksek olması ve bakım konularında yeterli uzmanlığa sahip kişileri bulmaktaki zorluklar, var olan kaynakların kullanımını baskılamaktadır.

Bu noktada santrifüj pompaların birkaç watt mertebesinde birkaç yüz kilowatt mertebesine kadar kolayca tedarik edilebilir olması, fiyatlarının uygunluğu, yapı olarak sağlam bakım gerektirmeyen cihazlar olması bu cihazları enerji üretim kaynağı olarak iyi bir alternatif

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ofalkan@outlook.com

haline getirmektedir [1]. Birçok ülkede bu tip santrifüj pompalar enerji geri kazanımı sistemlerinde tercih edilmektedirler [2]. Türbin kısmından bağımsız olarak asenkron jeneratörler de sağlam ve basit yapıları ve ulaşılabilir maliyetleri ile enerji üretimi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır [3]. Her ne kadar asenkron makinelerin (İndüksiyon motorlar) bir çok avantajı varsa da santrifüj pompaların asenkron makineler ile birlikte pazarda bulunabiliyor olması beraberinde bir problem de getirmektedir. Şebekeden bağımsız asenkron jeneratörlerin uç gerilimi ve frekansı şebeke yükü ile değişmektedir. Yükte değişen frekans ve gerilimin şebeke gibi stabil kaynaklar için tasarlanmış cihazlarda kullanılması olanaksızdır. Problemin çözümü ise yük kontrol mekanizmalarındadır. Jeneratörden talep edilen yükü takip ederek, yük değişimlerini sistemdeki balast yük ile kompanze eden bu sistemler asenkron jeneratör üzerindeki yük değişimini sınırlayarak uç gerilimi ve frekanstaki kaymayı da azaltmaktadır. Böylece asenkron makinelere sahip santrifüj pompalar, şebekeden bağımsız güç üniteleri olarak kullanımı mümkün hale gelmektedir.

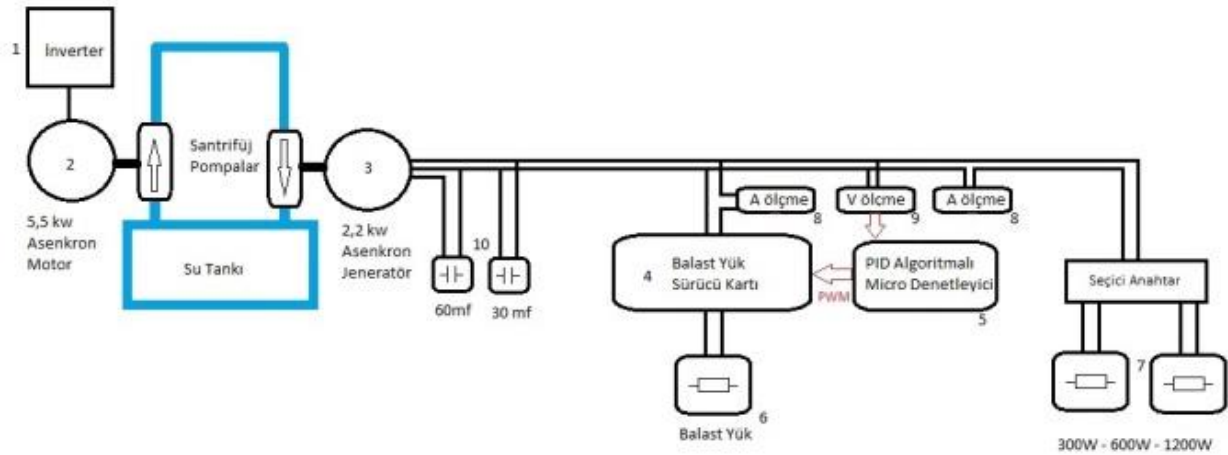
Şebekelerin ulaşamadığı تنها bölgelerde kullanılan 100kW gücün altındaki hidroelektrik jeneratörlerde kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlerin kullanımı ile bu tür makineler daha ulaşılabilir duruma gelirler. Fakat frekans ve gerilim regülasyonu yapan teçhizatların pahalılığı ve karmaşıklığı, ekstra maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. Ayrıca küçük güçlerdeki türbinlerde çoğu mekanik tasarımlarda, gelen suyun debisini kontrol edecek bir ayar mekanizması bulunmamaktadır. Bu sebeple jeneratör frekansını sabit tutmak için jeneratör yük kontrolünü yapmak daha kolay bir yol olarak ortaya çıkmaktadır. Yük kontrolü yapılmadığı zaman değişken yük altındaki asenkron jeneratörün aşırı devirlere çıkması veya geriliminin kaybolması sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu problemi çözmek için yapılan çalışmalarda sürücü kontrollü elektronik anahtarlamalar ile balast yüklerin sürüldüğü, böylece jeneratörün sabit yük altında çalıştırıldığı sistemler tasarlanmıştır [5]. Ayrıca asenkron jeneratör çıkış gerilimini, jeneratör çıkışına bağlanan kondansatörün inverter frekans regülasyonu ile sürülmesi ile kontrolünde, yapay sinir ağları yöntemleri de kullanılabilir. Bu yöntemde her yük durumu için ayrı ayrı hesaplama yapmak yerine, kurulan düzenekte farklı çalışma noktalarında ne kadar kondansatör değerine ihtiyaç duyulduğu yapay sinir ağına öğretildikten sonra, gerçek zamanlı olarak yapay sinir ağı tarafından kontrol edilerek anahtarlama elemanı vasıtası ile jeneratör gerilimi ve frekansı değişken yük altında sabit tutulabilmektedir [6]. Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün değişik yük koşulları altında, tasarlanan kontrol devresi ile performansı incelendiğinde, anahtarlama elemanı kaynaklı yük akımında harmonikler oluşabilmektedir. Yapılan çalışmada Elektronik Yük Kontrol kartı nominal gücünün %80'ne vardığında hat akımında oluşan harmonik THD %44,52 olarak ölçülmüştür [7].

Asenkron jeneratör kullanmasının önemli avantajlarından birisi de maliyet etkin olmasıdır. Jeneratörün terminal uçlarına bağlanan VSI tipi inverter ile tek fazlı bir güç kaynağı elde edilerek şebekeye güç aktarımı yapan ve Steinmetz bağlantısı yapılmış bir düzenek ile, üç fazlı jeneratörün uygun fiyat avantajı kullanılarak tek fazlı bir şebeke beslenebilmiştir [8].Yapılan bir başka çalışmada asenkron jeneratörün kontrol kartında bulunan balast yükler vasıtası ile ısıtma sistemi çalıştırılmış ve balast yüke verilen enerjinin kazanımı sağlanmıştır [9].

Çalışmamızda ise 3 fazlı asenkron jeneratör olarak kullanılan indüksiyon makinası, tek fazlı yükleri besleyeceği öngörüsü ile C-2C bağlantısı kullanılarak tek faza düşürülmüştür. Kendinden ikazlı indüksiyon jeneratörü stator uç gerilimi ve frekansı, jeneratörden çekilen yüke göre değiştiği için, jeneratör üzerindeki yükü sabit tutacak bir balast yük seti, balast yükü istenilen yük değerinde çalışmasını sağlayacak algortimaya sahip bir PID kontrol sistemi ve sürücü kartından oluşacak bir sistem tasarlanmıştır. Tasarım aşamasındaki hedef, kullanılabilir ve kabul edilebilir bir performans sağlayacak kontrol kartı sisteminin en uygun maliyetler ile elde edilmesinin sağlanmasıdır. Bu sebeple sistem mümkün olduğu kadar basit ve güvenilir tutulmaya çalışılmıştır. Tasarım sonrası testler esnasında jeneratör çıkış gerilimi harmonik değerleri ve jeneratör ile kontrol kartlarının termal resimleri alınarak güvenilir sınırlar içerisinde kaldıklarından emin olunmuştur. Sayısal ortamda MATLAB/SIMULINK benzeşim programı vasıtası ile çalışması test edilen kontrol sistemi, fiziksel olarak deney setine aktarılmış ve performans testleri uygulanmıştır.

Yapılan çalışmada benzer konulardaki daha önce yapılmış olan çalışmalardan farklı şekilde, jeneratör olarak kullanılan indüksiyon motor doğrudan miline bağlı başka bir motor ile tahrik edilmemiş, piyasada satıldığı şekli ile pompa-motor olarak alınarak, pompa kısmına ters su girişi beslemesi ile türbin olarak çalışması sağlanmıştır. Böylece sistem performans testlerinin, türbin olarak kullanılan santrifüj pompanın türbin olarak çalışırken ki karakterinin, elektrik üretimine etkisini de ihtiva etmesi sağlanmıştır.

Alınan ölçüm sonuçları tasarlanan yük kontrol kartının yük değişimleri esnasında jeneratör çıkış gerilimi frekansındaki değişimin %16 mertebesinde %1'e, % 34 olan gerilim değişimini %3 mertebesine düşürdüğü jeneratörün istenilen çıkış voltajı ve frekansında tuttuğunu göstermiştir. Yük atma ve yük alma esnasında yük kontrol kartının tepki süresinin 40 ila 150 ms arasında olduğu tespit edilmiştir. Tasarlanan sistemde kontrol kartı ve balast yük sürücü devresi maliyetinin 119,61 TL olduğu (2021 Ocak fiyatları ile) ve hedeflenen performansa sahip uygun fiyatlı bir tasarım yapıldığı doğrulanmıştır.



Şekil 1. Deney sistemi şematığı (Experimental system schematic)

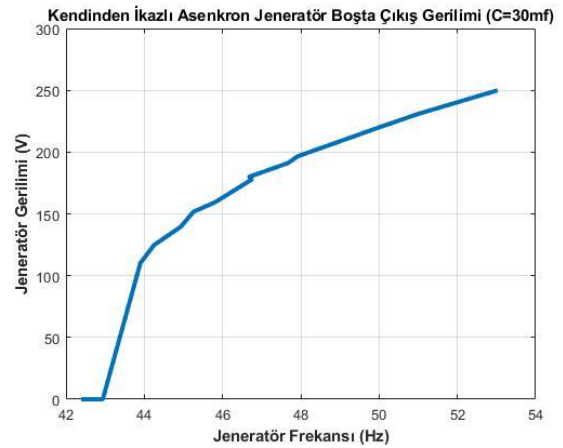
2. ÜRETİM SİSTEMİ (PRODUCTION SYSTEM)

Hazırlanan deney sistemi şekil 1. de şematik olarak gösterilmiştir. Herhangi bir yöntemle devir kontrolü olmayan santrifüj su pompası türbin olarak kullanılmıştır. Santrifüj pompa miline doğrudan bağlı indüksiyon motor da jeneratör olarak çalıştırılmıştır. 3 fazlı İndüksiyon Jeneratörünün tek fazlı yükleri besleyeceği öngörülerek C-2C bağlantısı ile tek fazlı bir AC güç çıkışı elde edilmiştir.

Kendinden ikazlı İndüksiyon Jeneratörün değişken kullanıcı yükü esnasında frekans, akım ve gerilimdeki değişmeyi ölçebilmek için akım sensörleri (Şekil 1. de 8 numara ile gösterilmiştir) ve gerilim bölücü dirençler kullanılmıştır. AC gerilimdeki regülasyona referans olacak örnekleme devresi bir transformator ve doğrultucu devresi ile sağlanmıştır (9). Değişken yüklerin yerini alacak kontra balast yükler (6) için de akkor flemanlı ampuller tercih edilmiştir. Değişken kullanıcı yüklerini temsil etmek için de rezistanslı ısıtıcılar (7) kullanılmıştır.

Mikro işlemci tabanlı bir kontrol ünitesi (5) vasıtası ile takip edilen İndüksiyon Jeneratör (3) uç gerilimi, PID kontrol mekanizması vasıtası ile PWM sinyale çevrilip, ardından IGBT kontrol elemanına sahip sürücü kartı (4) vasıtası ile DC voltaj altında çalışan Balast Yükler istenilen güçte devreye alınması sağlanmıştır.

Sistemdeki C ve 2C değerlerinin doğru bir şekilde tespiti için piyasadan temin edilen 30mf, 40mf değerlerindeki kondansatörler sırası ile deney setine bağlanıp, jeneratörün boştaki çalışma gerilimi ve frekansı ölçülmüştür. Şekil 2. deki grafikte C=30 mf değerinde kondansatör ile jeneratör istenilen boştaki çalışma frekansı olan 52 Hz de çıkış gerilimi 240Vrms civarında olduğu görülmektedir. Daha yüksek ve düşük kapasitedeki kondansatörler ile deney tekrarlandığında aynı frekansta daha yüksek ve daha düşük uç gerilimleri ölçüldüğünden, doğru kapasite değerinin 30mf olduğu tespit edilmiştir.

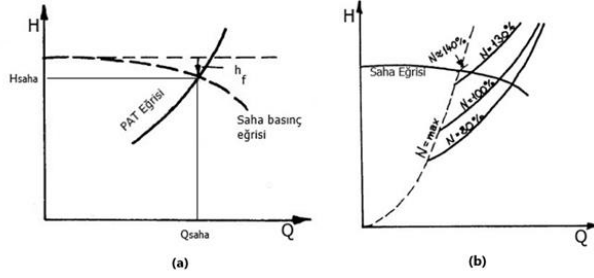


Şekil 2. C:30mf iken jeneratörün boştaki çalışma gerilimi ve frekansı ölçüm sonucu (Generator offload voltage and frequency results with C:30mf)

A. Santrifüj Pompaların Türbin Olarak Kullanılması (Using Centrifugal Pumps as Turbines)

Piyasada çokça ve ucuza bulunabilen asenkron motorlu santrifüj pompaların, pompa kısmının türbin olarak kullanılması için tersine su akışı gereklidir. Pompa olarak kullanıldığı esnada su çıkışı olan kısım, türbin olarak kullanım esnasında su girişi olarak kullanılır.

Pompanın üreticisinden temin edilen santrifüj pompanın H(Düşü)-Q(Debi) eğrisi ve devir bilgileri kullanılarak, türbin olarak çalışan santrifüj pompanın yaklaşık H-Q parametreleri hesap edilebilir. Sahada su kaynağından itibaren kullanılan boru çapı ve dönüş yarıçapları bilindiği için türbin noktasındaki net düşü hesap edilerek, türbinin H-Q eğrisi ile karşılaştırılır ve türbinin çalışma noktasındaki H-Q ve güç değerleri tespit edilebilir, örnek H-Q grafikleri şekil 3. de verilmiştir [10]. Daha detaylı bir tespit için CFD programları vasıtası ile türbin olarak çalışan pompanın nasıl bir verimlilikte ve güçte çalışacağı hesap edilmesi de mümkündür [11].



Şekil 3. (a) Türbin ve saha eğrisi kesişimi ile çalışma noktası tayin edilmesi (b) Farklı devirlerin çalışma noktasına etkisi ((a) Determination of operating point with turbine and field curve intersection, (b) The effect of different cycles on the operating point) [10]

Santrifüj pompaların yapısında debi ayarı yapacak bir sistem olmadığı için, değişken yüklerde çalışan türbin devrinde de değişiklikler olacaktır, bu sebeple türbinin çalışma noktası da değişecektir.

Q_p ; santrifüj makinenin pompa olarak kullanılırken ki su debisini,

Q_t ; santrifüj makinenin türbin olarak kullanılırken ki su debisini,

H_p ; santrifüj makinenin pompa olarak kullanılırken ki su basma yüksekliğini,

H_t ; santrifüj makinenin türbin olarak kullanılırken ki net düşü miktarını,

gösterirken aralarındaki bağlantı Eş.1 ve 2 deki gibi olacaktır.

$$H_t = \left[\frac{N_t}{N_p} \right]^2 \times H_p \quad (2)$$

B. Üç Fazlı İndüksiyon Motorun Tek Fazlı Kendinden Uyartımlı Jeneratör Olarak Kullanımı (Using of Three Phase Induction Motor as Single Phase Self Exciting Generator)

Eğer üç fazlı asenkron jeneratör tek fazlı yükleri beslemek için kullanılacak ise o zaman şekil 4. de görülen C-2C kondansatör bağlantısı kullanmak gerekecektir. Bu bağlantı şeklinde üç fazlı asenkron jeneratörün nominal gücünün %80'i ne kadar güç alınabilir [12].

I_{cap1} ; C_1 kondansatöründen geçen akımı,

I_C ; C_2 kondansatöründen geçen akımı,

I_{load} ; müşteri ve balast yükün sistemden çektiği akımı,

V_g ; jeneratör gerilimini

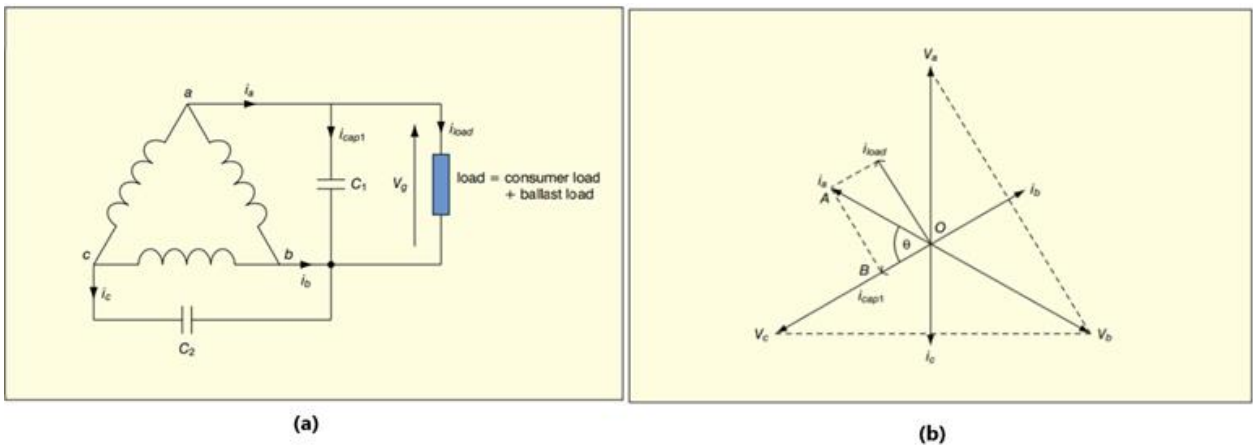
gösterirken sistemdeki akımlar arasındaki bağlantı Eş. 3 ve 4'te, jeneratör çıkış gücü de Eş. 5'te gösterilmiştir.

$$|\bar{I}_C| = 2 \cdot |\bar{I}_{cap1}| \quad (3)$$

$$|\bar{I}_{load}| = \sqrt{3} \cdot |\bar{I}_{cap1}| \quad (4)$$

$$V_g \cdot \bar{I}_{load} = \sqrt{3} \cdot V_g \cdot \bar{I}_{cap1} = \sqrt{3} \cdot V_{g2} \cdot \omega C_1 \quad (C_2 = 2 \cdot C_1 \text{ iken}) \quad (5)$$

C. İndüksiyon Jeneratör Yük Kontrolü (Induction Generator Load Control)



Şekil 4. (a) Üç fazlı jeneratörlerde C-2C Bağlantısı (b) Fazör Diagramı ((a) C-2C Connection in three phase generators, (b) Phasor Diagram) [5]

$$Q_t = \frac{N_t}{N_p} \times Q_p \quad (1)$$

Asenkron jeneratörler genellikle şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılırlar. Şebekeye bağlı çalışmanın getirdiği bazı kolaylıklar bulunmaktadır. Stator gerilim

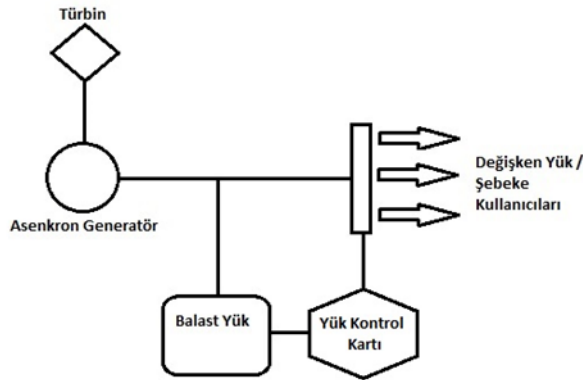
kaynağına bağlı olduğu için zaten mıknatıslanma akımı şebekeden alınmaktadır. Şebekeye bağlı çalışmanın getirdiği bir avantaj da frekansın şebeke tarafından kontrol edilmesidir.

Asenkron jeneratörler hidrolik türbinler gibi sürekli ve sabit bir tork ile beslenebiliyor ise, enerji üretmesi şebeke senkron devrinin üzerine çıkması yeterli olacaktır.

Şebekeden bağımsız çalışan asenkron jeneratörleri kontrol etmek ise daha zordur. Mıknatıslanma akımının sağlanması gerekliliği, stator gerilim ve frekansının jeneratör devrine ve değişken yük durumundan etkilenmesi kontrol işlemini zorlaştırmaktadır.

Santrifüj pompaların türbin jeneratör seti olarak daha çok şebekeden uzak yerlerde ve maliyet etkin işlerde kullanılması tercih edildiğinden, bu tür kullanımlarda kontrol yönteminin ucuz, sağlam ve bakım gereksiniminin minimum seviyede olması gerekir ki, asenkron jeneratörlerin senkron jeneratöre olan avantajları kaybedilmemiş olsun.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan kontrol yöntemi asenkron jeneratör çıkış yükünün sabit tutulması sureti ile jeneratör çıkış geriliminde ve frekansında meydana gelen değişimin sınırlandırılmasına dayanmaktadır. Yük kontrol kartının görevi, jeneratöre bağlı değişken yük durumlarında, yükteki değişim büyüklüğünde ama ters yönde bir balast yük devreye alıp çıkartarak, toplam jeneratör gücünün sabit kalmasını sağlamaktır. Tipik bir Yük Kontrol blok şeması şekil 5. de görülmektedir.



Şekil 5. Şebekeden bağımsız sistemlerde yük kontrol blok diyagramı (Load control block diagram in off-grid systems)

Bazı yük kontrol kartlarında asenkron jeneratörün ikazlama miktarı, ikazlama kapasitör bankları ile değiştirilerek voltaj regülasyonu sağlanırken, bir taraftan da rezistif yük bankaları ile de frekans regülasyonu yapılabilmektedir [13]. Bu tür kontrol kartları yapı olarak daha karmaşık ve yatırım maliyeti daha fazladır. Bu durum asenkron jeneratörün pratikliği, işletme kolaylığı ve ucuzluğu mantığına aykırı düşmektedir. Asenkron jeneratör için tasarlanan kontrol kartının geniş kullanım alanına ulaşması için basit ve işlevsel olmalı, bakım gereksinimi az ve erişilebilir bir fiyatı olmalıdır.

Zaten asenkron jeneratörün yapısı gereği, terminal uç gerilimini referans kabul ederek rezistif yükleri balast olarak kullanıp jeneratör gerilimini sabit tuttuğunuzda, aynı zamanda jeneratör frekansı da sabitlenmiş olmaktadır.

Jeneratör yüküne rezistif bir yük bağlandığında, jeneratör terminal geriliminde bir düşme olacaktır. Yük kontrol kartı bu gerilim kaybını ölçerek gerekli müdahaleyi yapar ve devreye giren yük ile aynı büyüklükte balast yükü devre dışı bırakır. Yük kontrol kartı durumu algılayıp işlemi gerçekleştirene kadar geçici bir süre frekans ve gerilimde düşme olacaktır, ancak kısa süre sonra gerilim de frekans da istenilen seviyeye dönecektir. Jeneratör yükü ise yük değişiminden önceki durumla aynı değerde olacaktır.

Eğer jeneratöre endüktif bir yük bağlanırsa, terminal geriliminde yine bir düşme olacaktır ve yük kontrol kartı yine gerilimi eski haline getirmek için balast yüklerin bir kısmını devreden çıkartacaktır. Bu düşme etkisiyle jeneratör yükünde dolayısı ile türbin yükünde de bir düşüşe yol açar, türbin hızında ve jeneratör frekansında bir yükselme olur. Jeneratör frekansı yükseldiğinde jeneratör mıknatıslanma akımı düşer ve kapasitelere giden akım artar. Sonuç olarak terminal gerilimi eski haline geri gelecektir. Bu durumda frekanstaki artış miktarı sınırlı kalacaktır ve %10 sınırının altında kalacaktır. Bu durum güç faktörü 0,9 olan yükler için geçerlidir. Eğer çok daha büyük endüktif yükler bağlanırsa, kapasitif düzeltme zorunlu hale gelecektir.

3. MODELLEMENİN OLUŞTURULMASI (CREATING THE MODEL)

Blok şeması şekil 6. da gösterilen SIMULINK modeli hazırlanırken türbin yerine geçen santrifüj pompanın bir modelinin tahrik edici ünite olarak sisteme eklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bir başka motoru tahrik sistemi olarak modele eklenmesine karar verilmiştir. 5,5kw gücünde 3000 rpm asenkron makine SIMULINK kütüphanesinden seçilerek modele eklenmiştir. Bu motorun sürülmesi için 460V 50Hz alternatif akım güç kaynağı modele eklenmiştir. Bu motorun mekanik mil hızı, alt sistemin çıkış portu olarak, motorun mekanik yükü ise giriş portu olarak tanımlanmıştır. Güç kaynağı ve asenkron motor bir alt sistem olarak kaydedilmiş ve Hidrolik Türbin Bloğu adıyla alt model olarak tanımlanmıştır.

Hidrolik Türbin Bloğu çıkış hızı bilgisi, deneyde asenkron jeneratör olarak çalışacak olan asenkron makine bloğunun hız bilgisi girişine bağlanmıştır. Asenkron makine şebekeden bağımsız jeneratör olarak çalışacağı için kendisini ikazlayacak daimi kondansatörlere ihtiyacı vardır. Daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere C-2C bağlantısına uygun olacak şekilde SIMULINK modeline de biri 30µf diğeri 60µf kapasite değerine sahip kondansatör grupları eklenmiştir. Kondansatörler ve asenkron jeneratör arasına jeneratör terminal gerilimlerini ölçmeye yarayan gerilim ölçüm

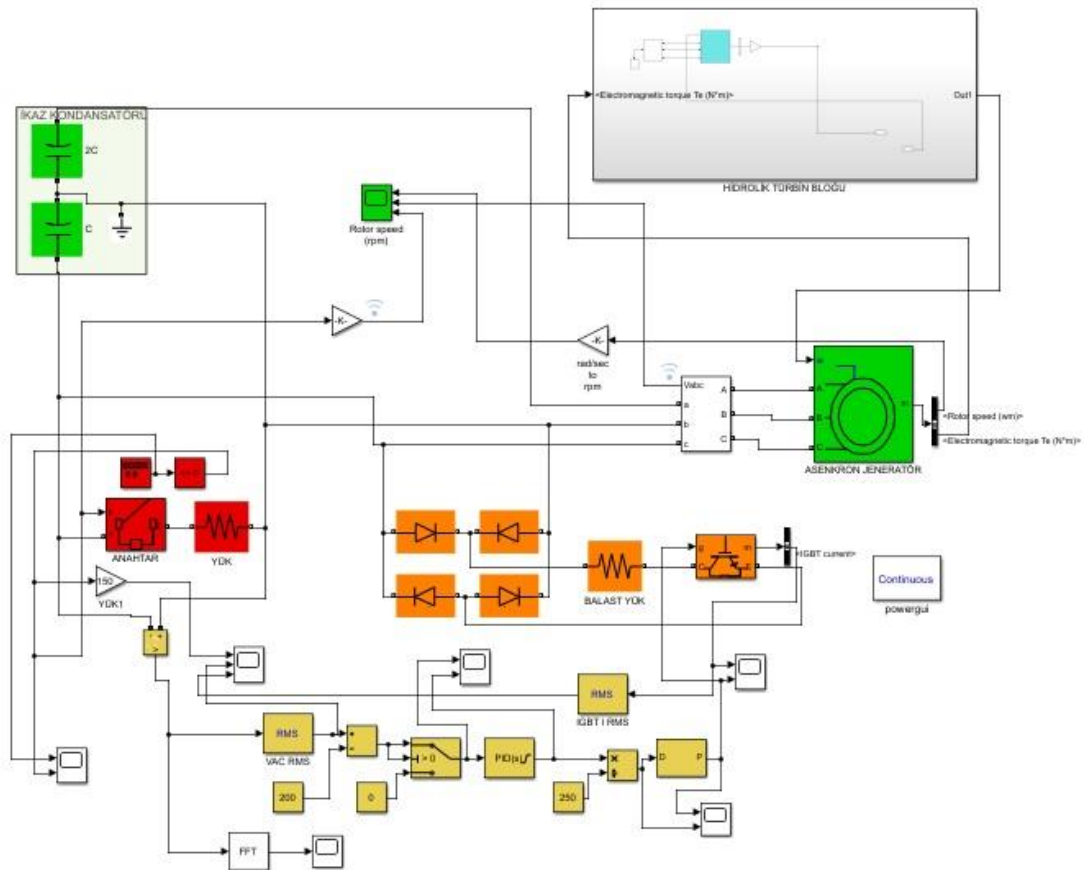
bloğu yerleştirilmiş ve ölçüm çıkışı bir göstergeye bağlanmıştır.

Model bu hali ile boşta çalışma gerilimi üretecek hale gelmiştir. Ancak artık manyetizmanın modele tanıtılması için, asenkron jeneratörün rotor akım başlangıç hesabı değeri olarak 1 amper girilmesi gerekmektedir. Böylece fiziksel deneyde kondansatörler ile birlikte ilk manyetizmayı oluşturacak olan artık manyetizma modele eklenmiş olmaktadır. Modele Powergui hesaplama bloğu da eklenip, sürekli durum analizi seçilerek deneyin modellemesi denenmiştir. Asenkron jeneratörün boşta çalışma gerilim karakteristiği bu deney sonucu ile elde edilmiştir. Asenkron jeneratörün değişken yük altındaki karakteristiğini incelemek için kullanıcı yükü sisteme eklenmelidir. Bu deney için kullanıcı yükü bir ideal anahtar üzerinden C (30 μ F) kondansatörünün uçlarına bağlanmıştır. Kondansatör gerilimi aynı zamanda tek fazlı yükleri besleyen jeneratör gerilimidir. İdeal anahtarın anahtarlama süresinin ayarlanması için zamanlama devresi eklenmiş ve istenilen sürelerde kullanıcı yükünün jeneratöre bağlanması ve ayrılması

olarak belirlenmiştir. SIMULINK PID modeli asenkron jeneratör uç geriliminin etkin değerini ölçmeli ve referans gerilim ile karşılaştırarak hatayı bulmalıdır. Bu işlemleri yapabilmesi için jeneratör terminal gerilim bloğu çıkışı RMS bloğuna girilmiş ve bu bloğun çıkışı da hata tespitinin yapılabilmesi için 230 Vrms ile kıyaslanmıştır.

Sistem gerilimi 230 Vrms değerine ulaşmadan balast yükün devreye girmesini önlemek için hata değerinin pozitif bileşeninin hesap edilmesi gerekmektedir. Bu işlemi modellemek için bir şartlı anahtar bloğu modele eklenmiştir. Bu blok hatanın negatif değerlerinde çıkış portuna 'sıfır' değeri çevirirken, hatanın pozitif olduğu durumlarda hatanın kendisini çıkış portuna aktarmaktadır. Böylece sadece sistem gerilimi 230 Vrms'ün üzerine çıktığında PID algoritması balast yükü devreye almaya başlayacaktır.

PID algoritması için SIMULINK PID bloğu modele eklenmiştir. Girişine hata sinyali bağlanmıştır. PID algoritması içerisinde K_p , K_i ve K_d kazanç miktarları seçilebilmektedir. Ayrıca sinyal filtreleme, çıkış sinyali



Şekil 2. Deney setinin MATLAB 2019A ortamında SIMULINK ile modellenmesi (Modeling the experiment set in MATLAB 2019A environment with SIMULINK)

sağlanmıştır. Bu şekilde asenkron jeneratörün değişken yük altındaki deneyleri yapılmıştır. Değişken yük esnasında asenkron jeneratör gerilim ve frekansındaki değişimleri engelleyecek olan kontrol kartı PID algoritmasını içermektedir. PID algoritmasının sistem gerilimini sabit tutmak için hedef referans gerilim 230V

alt sınırı ve üst sınırı belirlenmesi işlemleri yapılabilmektedir. Filtreleme özelliği tanımlaması yapılmamıştır. Çıkış sinyali alt sınırı 0, üst sınırı ise 250 olarak tanımlanmıştır.

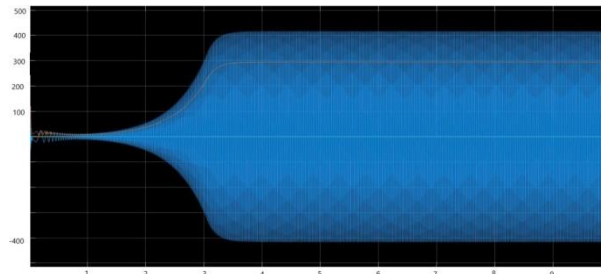
PID bloğu çıkışına, balast yükü sürececek olan IGBT nin oransal anahtarlama için gerekli PWM sinyali üreteç

bloğu bağlanmıştır. PWM bloğu giriş sinyali 0 ila 1 değerleri arasında olmalıdır ki, çıkış PWM görev zamanı (duty cycle) 0-100% arasında olabilsin. Bu şartı sağlamak için PID algoritması çıkış sinyali 250 değerine bölünerek, PWM dönüştürücü bloğuna gelen sinyalin en fazla 1 değerine sahip olması sağlanmıştır.

PWM dönüştürücü bloğun çıkış sinyali artık IGBT'yi sürmek için kullanılacağından doğrudan IGBT elemanının Gate ucuna bağlanmıştır. Deney setinde kullanılan mikro denetleyici Arduino Uno PWM sinyali frekansı da yapılan testlerde 500 Hz olarak ölçüldüğünden, PWM dönüştürücü anahtarlar frekansı da 500 Hz olarak seçilmiştir. Balast yükün sürülmesi için jeneratörün terminal çıkış gerilimi diyotlar ile doğrultulmuş ve IGBT üzerinden balast yükün oransal kontrolü modelleme üzerinde sağlanmıştır. Balast yük 1000 W olarak belirlenmiştir. Farklı oransal kazanç (K_p), integral kazanç (K_i) ve türev kazancı (K_d) değerleri denenerek, çıkış tepki süresi, sürekli hal gerilim durumu ve oransal bant değerleri irdelenerek en iyi PID parametreleri tespit edilmiştir.

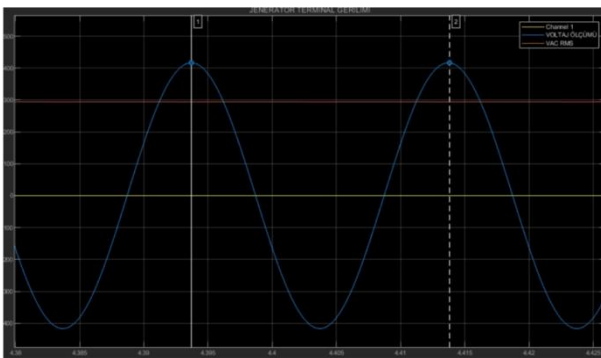
4. MODELLEME SONUÇLARI (MODELING RESULTS)

Deney setinin MATLAB SIMULINK modelinde yüksüz durumdaki asenkron jeneratörün uç gerilimi grafiği şekil 7. deki gibi elde edilmiştir.



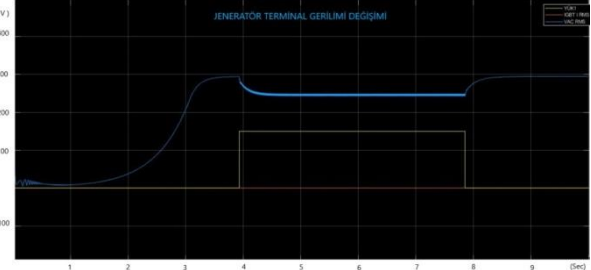
Şekil 7. Kendinden ikazlı jeneratörün boşa çalışma gerilimi (Voltage of self-excited generator at no load condition)

Grafik büyütülüp tam bir periyodun genliği ölçüldüğünde maksimum değerinin 416,4 V olduğu, etkin değerinin 294,2 V olduğu ve frekansının 50 Hz olduğu şekil 8. de görülmektedir.



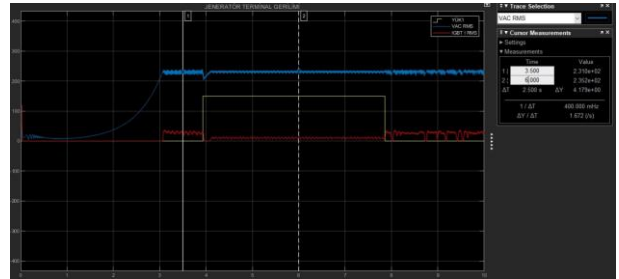
Şekil 8. Boşa çalışan kendinden uyartımlı asenkron jeneratörün gerilim dalga şekli (Voltage waveform of self-excited asynchronous generator at no load condition)

Herhangi bir kontrol düzeneği aktif hale getirilmeden asenkron jeneratör uçlarına 600 W'lık bir yük bağlandığı zaman gerilimde düşme meydana geldiği andaki grafik şekil 9. da gösterilmiştir. Gerilimin etkin değeri 242,6 V, frekansını ise 48,54 Hz olarak ölçülmüştür. Voltaj etkin değerindeki düşüş %17,6 ve frekansta 1,46 Hz düşme meydana gelmiştir.



Şekil 9. Kontrol devresi devre dışı iken 600 W yük altında gerilimin değişimi (Variation of voltage under 600 W load while control system is disabled)

Kontrol sistemi etkin hale getirildiğinde PID sistemi balast yükü oransal olarak devreye alarak sistem geriliminin 230 Vrms mertebesinde sabit tutulduğunu gösteren grafik şekil 10. da verilmiştir. Kullanıcı yükü devreye girdiğinde sistem gerilimi 230Vrms mertebesinde sabit kalmaktadır. Oransal Bant hatası PID nin K_p kazancından ve IGBT nin anahtarlamasının devrede oluşturduğu harmonik bozulmadan kaynaklı 7 V (%3) değerinde bir dalgalanma ortaya çıkmaktadır.



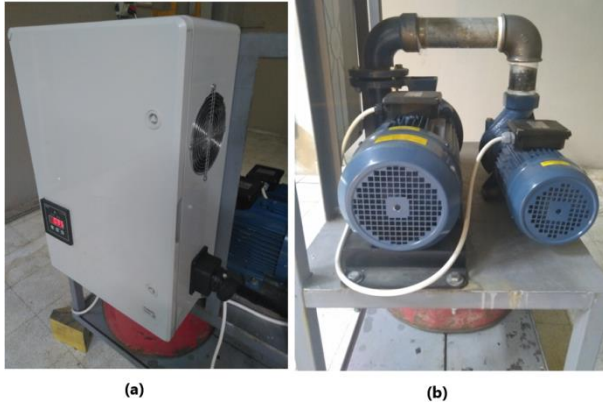
Şekil 10. Kontrol sistemi devrede iken yük değişimi anında gerilim dengelenmesi (Voltage balancing at the time of load change while the control system is active)

5. DENEY FİZİKİ ÖLÇÜM SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS OF PHYSICAL MEASUREMENT)

A. Kontrol Sistemi Devre Dışı İken Yapılan Ölçüm Sonuçları (Measurement Results With the Control System Disabled)

Fiziki ölçümlerin yapıldığı deney setinde su kaynağını temsil eden santrifüj pompa-motor seti olarak 2900 dv/dk, 380 V, 5,5 kW, 50 Hz lik bir ünite seçilmiştir. Türbin-jeneratör sistemini temsil eden kısımda ise 2900 dv/dk, 380 V, 2,2 kW, 50 Hz lik bir ünite seçilmiş ve deney seti hazırlanmıştır. 5,5 kW gücündeki pompa inverter vasıtası ile sürülmüş ve değişik su girişi basınçlarında türbin performansı incelenmiştir. Deney setindeki pompalarda hız kontrolü uygulanmamıştır.

Deney setinin görüntüsü ve balast yükü değişik yüklerde süren kontrol kartı sırası ile şekil 11. ve şekil 12. de görülmektedir.



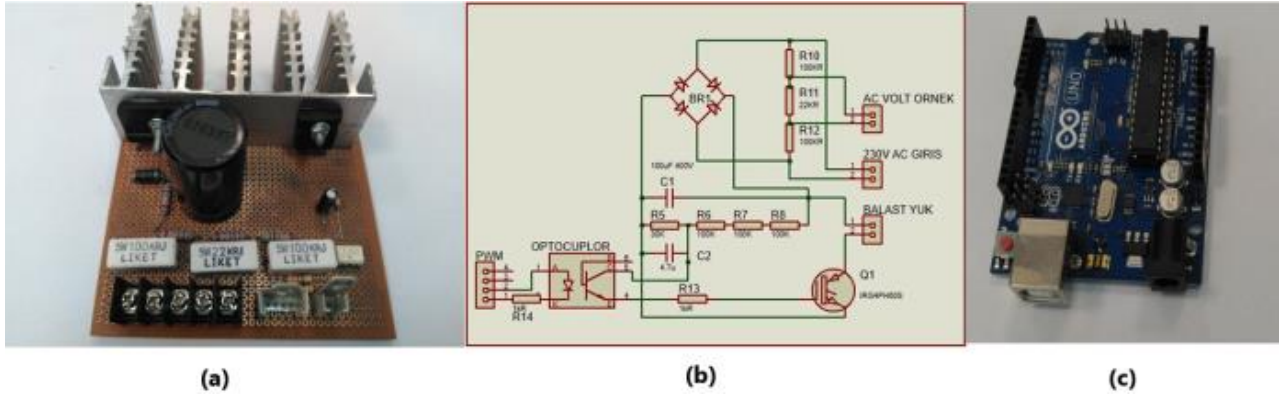
Şekil 11. (a) Deney setinin Pompa Besleme Panosu (b) Pompa ve Türbin-Jeneratör setinin arkadan görünüşü ((a) Pump Feeding Panel of the Experiment Set , (b) Rear view of the Pump and Turbine-Generator set)

Fiziksel ölçümlerde kullanılan Instrustar marka 2 kanal PC osiloskop, Fluke marka multimetre ve Fluke marka Termal kamera resimleri şekil 13. de gösterilmiştir.



Şekil 13. Deney seti fiziksel ölçümlerinde kullanılan ölçüm aletleri (Instruments used in the physical measurements of the experiment set)

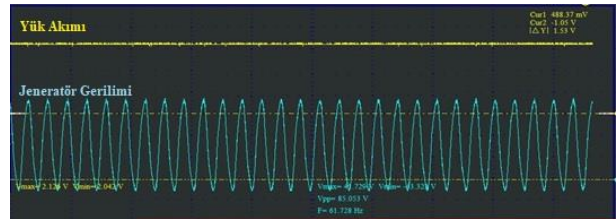
Bununla beraber grafiklerde görüleceği üzere jeneratör uç gerilimi frekansı yüksüz durumda 61,7 Hz değerine kadar yükselmiştir. En düşük ölçülen frekans 53 Hz civarındadır. Gerilimin frekansındaki değişim %16.3 tür. Bu şekilde yüksek frekans ve gerilim değişimlerinin



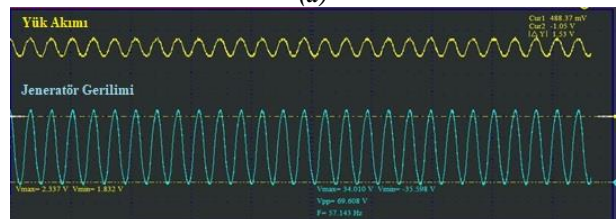
Şekil 12. (a) Balast Yük PWM Sürücü Kartı, (b) Sürücü Kartı şeması (c) Kontrol kartı ((a) PWM Driver card for Ballast Load, (b) Driver Card Schematic, (c) Control Card)

Türbin olarak çalışan santrifüj pompalarda asenkron jeneratör kontrol sistemine bağlı değilken, terminallerine bağlanan farklı değerlerdeki yüklerin akım ve gerilim dalga şekilleri incelenmiştir. Şekil 14. incelendiğinde türbin olarak çalışan pompaya bağlı asenkron jeneratörün terminallerine herhangi bir yük bağlanmadığında 310,3 Vrms değere ulaştığı ve 230 Vrms (325,26 Vpeak) sınırlarını gösteren yatay eksen çizgilerinin dışına çıktığı görülmektedir. Sarı renk ile gösterilen dalga şekli yük akımını temsil ederken, mavi renk ile gösterilen dalga şekli yük gerilimini yani jeneratör terminal gerilimini temsil etmektedir. 330 W gücünde yük bağlandığında 254 Vrms değeri jeneratör terminal uçlarında okunurken, 600 W yük altında çıkış geriliminin 230 Vrms hedef değerde olduğu ve yatay çizgilerin sınırında seyrettiği görülmektedir. 1200 W gücünde bir yük terminal uçlarına bağlandığında jeneratör uç gerilimi 171 Vrms değerine kadar inmektedir.

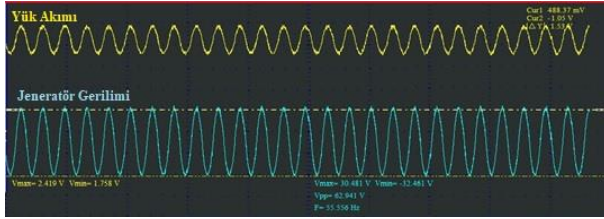
oluşturduğu kontrolsüz türbin jeneratör sistemlerinde, eğer jeneratör hassas elektronik devrelere sahip yükler besliyor ise, yüklerin zarar görmesi muhtemeldir.



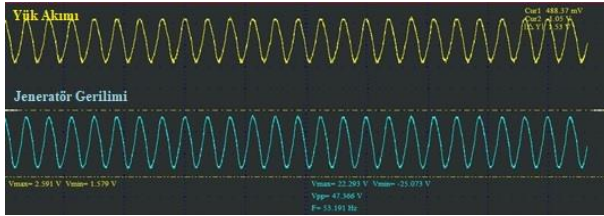
(a)



(b)



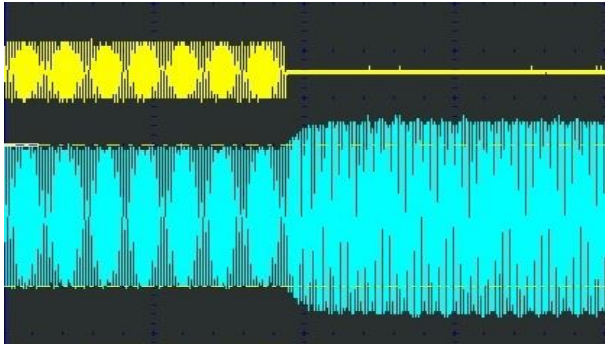
(c)



(d)

Şekil 14. Yük Kontrol Sistemi devre dışı iken Yük Akımı ve Jeneratör Gerilimi dalga şekilleri; (a)Yüksüz durum (b) 330 W yük altında (c) 600W yük altında (d) 1200W yük altında (Load Current and Generator Voltage waveforms while Load Control System disabled; (a) Un load (b) At 330Wload (c) At 600W load (d) At 1200W load)

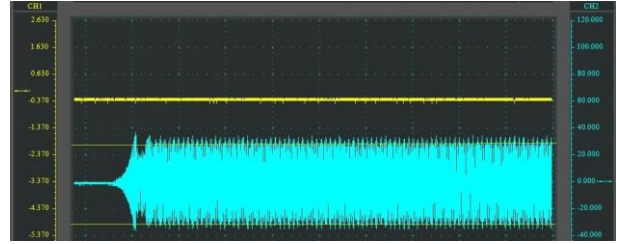
Şekil 15. de türbin olarak çalışan santrifüj pompaya bağlı asenkron jeneratörün beslediği 600 W yük devre dışı olduğunda oluşan geçici durum grafikleri gösterilmektedir. Sarı renk ile temsil edilen yük akımı kesildiği zaman yani yük devre dışı kaldığı anda, jeneratör uç geriliminde ani yükselme yaşanmaktadır.



Şekil 15. Kontrol Sistemi devre dışı iken 600 W yükün devre dışı kalması durumunda jeneratör uç gerilimindeki yükselme (The increase in the generator terminal voltage while the 600 W load is deactivated during Control System is disabled)

B. Kontrol Sistemi Devrede İken Yapılan Ölçüm Sonuçları (Measurement Results While the Control System is Activated)

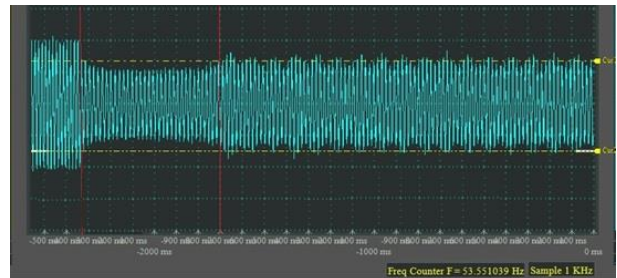
Türbin olarak çalışan santrifüj pompaya bağlı asenkron jeneratörün, değişken yük altındaki gerilim ve frekans sapmalarını giderecek bir kontrol sistemi tasarlanmış ve deney setine bağlanmıştır. Asenkron jeneratör durur halde iken, türbine gelen su tahriki ile dönmeye başladığı anda gerilim indükleniyorken, gerilim değeri 230 Vrms değerini aşmaya başlaması ile kontrol sistemi müdahale ederek, sistem gerilimini 230 Vrms'de sabit tuttuğu şekil 16. da görülmektedir.



Şekil 16. Kontrol Sistemi devrede iken jeneratörün kendini ikazlaması ve ilk devreye alınması esnasında gerilimin sabitlenmesi (Self-excitation of the generator while the Control System is active and stabilizing the voltage during the startup)

Jeneratörün gerilim indüklemeye başlamasının ardından 230 Vrms referans çizgisini aştığı anda PID algoritması tepki vermeye başlamaktadır. İlk tepki ile kısa süreli gerilimde hızlı bir düşme yaşandıktan sonra kontrol kartı 230 Vrms referans değeri arasında kalan ince çizgiler, gerilimin ana harmonik bileşeni olmayıp, anahtarlama elemanının etkisi ile ortaya çıkan harmonik bozulma etkileridir.

Şekil 17. de, asenkron jeneratör aşırı devir esnasında iken ve terminal gerilimi 300 V değeri üzerinde seyrederken, tasarlanan kontrol kartının devreye alınması ile jeneratör uç gerilimi 230 Vrms referans gerilimi seviyesine gelerek sürekli durum halini kazanmıştır. Kırmızı renk ile işaretlenen geçici durum dengesizlik süresi 600 ms dir. Bu süre sonunda, PID algoritması sistem gerilimindeki düzeltmeyi yapmayı başarmıştır. Bu durum kontrol kartı için en zorlu testtir. Çünkü jeneratör aşırı devire zaten ulaşmış haldedir, aşırı gerilim değerinde ve doyum halindeki makinenin ataletinde göz önüne alırsak, PID algoritmasının düzeltme yapmak için önceden alabileceği bir aksiyon bulunmamaktadır. Bu durumda dahi tasarlanan kontrol kartı kısa sürede istenilen regülasyonu sağlayabilmektedir.

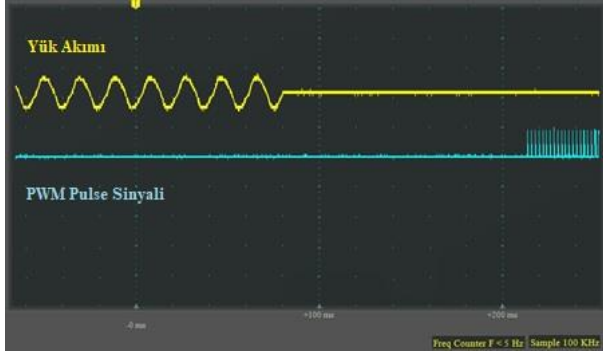


Şekil 17. Aşırı devir esnasındaki Jeneratörün uç geriliminin Kontrol Kartının devreye girmesi ile dengelemesi (Balancing of the terminal voltage of the Generator during overspeed after activation of the Control Card)

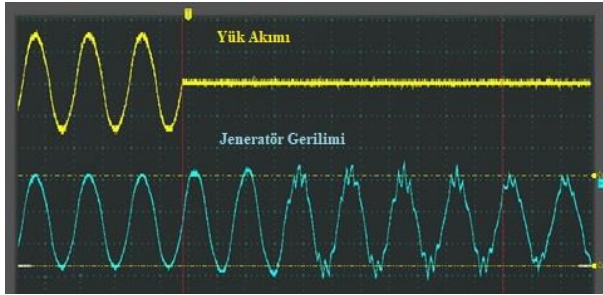
Kontrol kartının işlevini değerlendirebilmek için asenkron jeneratörün yük alma ve yük atma anındaki geçici durum kabiliyetini irdelemek gerekir. Yük alma anında jeneratör gerilimindeki azalmayı ölçerek hızlı şekilde balast yükü gerektiği oranda devre dışı bırakması gerekir. Yük alma anında da jeneratör gerilimindeki ani yükselmeyi ölçerek hızlı şekilde balast yüke gereken

oranda gerilim uygulayarak devreye alması gerekmektedir.

Şekil 18. de yük altında çalışan asenkron jeneratörün yük atması esnasında, kontrol kartının balast yükü devreye almak için uyguladığı PWM kare dalga sinyali görülmektedir. Yük akımı kesildikten yani jeneratör yük attıktan çok kısa süre sonra kontrol kartı düzeltme tepkisi vermeye başlamıştır. Kontrol kartının gerilimdeki artmayı ölçmesi ve duruma tepki vermesi yaklaşık 150 ms sürmüştür. Bu sürenin bir kısmı asenkron jeneratörün geriliminin yükselmesi için gerekli süredir.



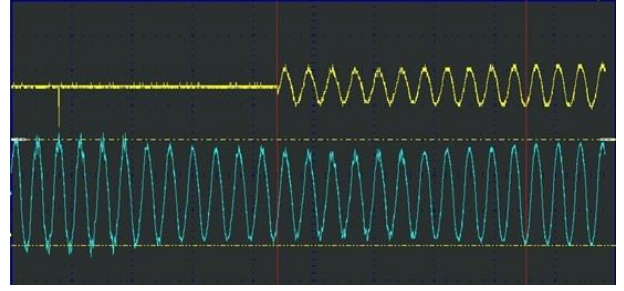
Şekil 18. Jeneratörün yük atması esnasında Kontrol Kartı tepkisi (Control Card response during generator load shedding)



Şekil 19. Jeneratörün yük atması esnasında gerilim dalga şekli (Voltage waveform during generator load shedding)

Şekil 19. da 600 W'lık bir yükün asenkron jeneratörden ayrılması esnasında ortaya çıkan geçici durum dalga şeklini göstermektedir. Sarı renk ile temsil edilen yük akımı kesildikten, yani yük atma işlemi gerçekleştirildikten sonra sadece 2 periyot (40 ms) içerisinde düzeltme işlemine başlamış ve toplam 5 periyot (100 ms) içerisinde gerilimi istenilen referans çizgileri arasında regüle etmeyi başarmıştır.

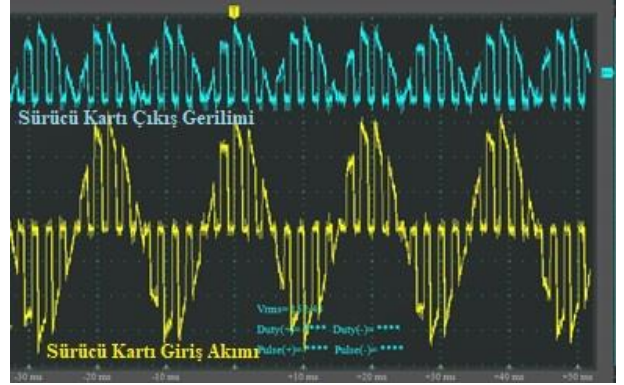
Bu grafikte kontrol kartının tepkisinin başlangıcını, gerilim dalga şeklinde oluşan harmonik etkiden anlamak mümkündür. Başlangıçta balast yük sıfır olması sebebiyle ve jeneratörün tüm yükü kullanıcı yükü olduğundan, gerilim dalga şeklinde harmonik bozulma etkisi görülmezken, yük atma sonrası balast yükün devreye girmesi ile birlikte gerilim dalga şekli uç noktalarında harmonik bozulma etkisi görünür hale gelmektedir. Harmonik bozulma gerilim dalga şeklinde büyük bir bozulmaya sebep vermeyip, gerilim ana şeklinde bir değişiklik oluşturmamaktadır.



Şekil 20. Jeneratörün yük alması esnasında geçici durum dalga grafikleri (Transient wave graphics during generator loading)

Şekil 20. de kontrol kartı tarafından denetlenmekte olan asenkron jeneratöre 600 W gücündeki yük bağlanması durumunda ortaya çıkan geçici durum dalga şekli görülmektedir. Şekil incelendiğinde yükün devreye alınması ile birlikte bir miktar gerilim düşmesi yaşandığı ve kontrol sisteminin gerilimi regüle etmesinin 9 periyotluk bir süre aldığı görülmektedir. Bu süre yaklaşık 180 ms dir.

Yük atma esnasında 100 ms olan regülasyon süresi, yük alma esnasında 180 ms olmasının sebebinin, bağlanan yükün akımında süregelen artış olabileceği kanaatine varılmıştır. Yük atmada yük akımı aniden kesildiği için geçici durum daha kısa sürmekte iken, yük alma esnasında yük akımının sürekli halini alması bir kaç periyot sürmektedir. Şekil 20. de yük akımının artan bir seyir izleyerek yaklaşık 10 periyot sonunda sürekli haline ulaştığı görülmektedir.



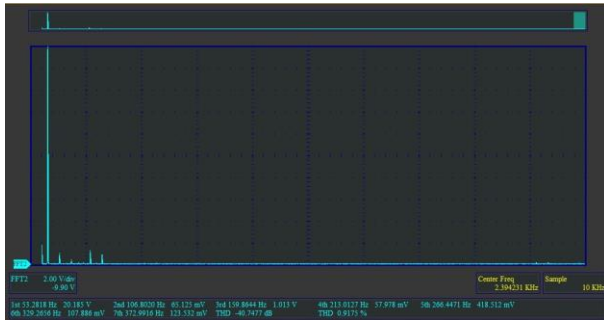
Şekil 21. Balast Yük Sürücü Kartı çıkış gerilimi ve giriş akımı dalga şekli (Ballast Load Driver Card output voltage and input current waveform)

Tasarlanan kontrol kartı PWM dalga şekli ile IGBT elemanının akımını kontrol ettiği için harmonik bozulma kaçınılmazdır. Şekil 21. de balast yük akımı ve gerilimindeki bozulma gösterilmiştir. Jeneratör gerilim dalga şeklinde uç noktalarında gözlemlenebilen bu bozulma etkisinin hesabı için FFT analiz yöntemi kullanılmaktadır ve bozulma etkisi THD% olarak hesap edilmektedir. Kullanılan osiloskop programının THD% harmonik bozulma miktarı ölçme kabiliyeti bulunmaktadır. Şekil 22. de kontrol kartı (balast yük) devrede değilken yani harmonik bozulma etkisi yokken, hesap edilen THD% si ile, şekil 23. de kontrol kartı

devredeyken yani bozulma etkisi var iken ki THD% değeri ölçümleri ve FFT analiz grafikleri görülmektedir.



Şekil 22. Balast Yük devre dışı iken THD %0,88 (During Ballast Load disabled THD %0,88)



Şekil 23. Balast Yük devrede iken THD %0,917 (During Ballast Load disabled THD % %0,917)

Her iki grafik altında iki duruma ait harmonik etkiler ve genlikleri ile birlikte THD% miktarları da görülmektedir. Balast yük devreye girdiğinde THD% miktarı 0,88 den 0,917'ye yükselmektedir. Yani toplamda %0,03 lük artış oluşmaktadır. Çizelge 1. incelendiğinde IEEE519-2014 standardına göre kontrol sistemi kaynaklı harmonik bozulma uluslararası standartların izin verdiği limitler içerisinde olduğu görülmektedir [14]. Bu sebeple kontrol kartının önlem alınması gereken miktarda harmonik kaynaklı bir problem oluşturmadığı kanaatine varılmıştır.

Çizelge 1. IEEE519-2014 Harmonik limit değerleri (IEEE519-2014 Harmonic limit values)

| BARA VOLTAJİ | THD % LİMİTİ |
|--------------------|--------------|
| V < 1 kV | 8 |
| 1 kV < V < 69 kV | 5 |
| 69 kV < V < 161 kV | 2.5 |
| 161 kV < V | 1.5 |

6. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu araştırmada, türbin olarak kullanılan santrifüj pompanın jeneratör olarak kullanılan asenkron makinesinin, şebekeden izole olarak çalışırken değişken yük koşullarındaki performansının yükseltilmesi için elektronik kontrol kartı tasarlanmıştır. Kendinden ikazlı çalışan üç fazlı asenkron makine ile tek fazlı yüklerin beslenmesi incelenmiş balast yük sürücü kartı

hazırlanmış ve test edilmiştir. Yük kontrol kartının asenkron jeneratör uç gerilimini kontrol etmesi için PID kontrol sistemi kullanmıştır.

Çalışmada santrifüj pompaların türbin-jeneratör seti olarak kullanımının problemsiz ve kolay olduğu, kontrol kartı olmadığı durumlarda yaşanan aşırı devirlerde türbin ve jeneratörde problem oluşmadığı, üç fazlı motorlarda tek fazlı yüklerin beslenmesinin mümkün olduğu, bu tür çalışmalarda faz başına düşen güç aşılmadığı sürece jeneratörde herhangi bir aşırı ısınmaya sebebiyet vermediği tespit edilmiştir. PID kontrol sistemi algoritmasının, asenkron jeneratörün uç gerilimi regülasyonunda gayet başarılı şekilde çalıştığı ve jeneratör performansında ciddi iyileşme sağladığı görülmüştür. Sonuçlara göre kontrol kartı ile sürücü kartı kaynaklı gerilim bozulmaları düşük seviyede kalmaktadır, limitler içerisinde ve güvenle kullanılabilir. Türbine uygulanan hidrolik kuvvetteki değişimlerde yük kontrol kartı sistemi sürekli kontrol altında tutarak jeneratör geriliminde yükselmeye müsaade etmemektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: BY 1735).

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Osman Fırat ALKAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir ve makalenin yazım işlerini gerçekleştirmiştir.

Sibel AKKAYA OY: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bucur D. M., Tanase N. O., Ghergu C. M. and. Isbaşoiu E. C, "Using Standard Pumps as Turbines", *Applied Mathematics and Mechanics*, 2: 275-278, (2009).
- [2] Ramos H. and Borga A., "Pumps as Turbines: Unconventional Solution to Energy Production", *Urban Water*, 1(3): 261-263, (1999).
- [3] Swartha V. and Nithiyannan K., "Squirrel cage Induction Generator simulations on MATLAB/SIMULINK environment", *Proceedings of ICRTE*, 135-149, (2017).
- [4] Smith N. P. A., "Induction Generators for Stand-Alone Micro-Hydro Systems", *Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 669-673, (1996).

- [5] Ekanayake J., "Induction Generators for Small Hydro Schemes", *Power Engineering Journal*, 16(2): 61-67, (2002).
- [6] Ünal S. ve Özdemir M., "Tek Fazlı Asenkron Generatörün YSA Tabanlı Modellenmesi", *ELECO*, 1-5, (2004).
- [7] Shing B., Tandon A., Goel M. and Murthy S., "A Steady State Analysis on Voltage and Frequency Control of Self Excited Induction Generator in Micro-Hydro System", *International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, 1-6, (2006).
- [8] Dias J. A., dos Santos Jr E. C. and Rocha N., "Low Cost Single-Phase Grid-Tie Generator", *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1-6, (2013).
- [9] Yuvarajan S. and Tariq M., "Simulink Based Modeling, Analysis and Simulation of Self Excited Induction Generator For Use In Remote Areas", *IU-JEEE*, 13: 16-23, (2013).
- [10] Williams A., "Pumps As Turbines A Users's Guide", *Intermediate Technology Publications Ltd.*, London, (1995).
- [11] Bogdanovic-Jovanovic J. B., Milenkovic D. R., Svrkota D. M., Bogdanovic B. and Spasic I. T., "Pumps Used as Turbines Power Recovery, Energy Efficiency, CFD Analysis," *THERMAL SCIENCE*, 18 (3): 1029-1040, (2014).
- [12] Smith N., "Motors As Generators for Micro-Hydro Power," *Replica Press*, Warwickshire, (2008).
- [13] Çalışkan A., "Constant Voltage and Constant Frequency Operation of a Self Excited Induction Generator," *M.S. thesis*, Dept. Elect. and Electron. Eng., ODTU Univ., (2005).
- [14] Şenel C., "*Güç Kalitesi Problemleri ve Çözümleri*," www.emo.org.tr/ekler/61deb408cb055eb_ek.pdf, (2019).