



**GAZİOSMANPAŞA BİLİMSEL ARAŞTIRMA DERGİSİ (GBAD)**  
**Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research**  
ISSN: 2146-8168  
<http://dergipark.gov.tr/gbad>  
**Araştırma Makalesi (Research Article)**

Cilt/Volume : 6  
Sayı/Number: Özel  
(ISMSIT2017)  
Yıl/Year: 2017  
Sayı/Pages: 59-72

**Alınış tarihi (Received):** 16.10.2017  
**Kabul tarihi (Accepted):** 26.12.2017

**Baş editor/Editors-in-Chief:** Ebubekir ALTUNTAŞ  
**Alan editörü/Area Editor:** Turgut ÖZSEVEN /  
Bülent TURAN

## Üç Fazlı Senkron Bir Makinenin Değişken Yük Durumları için Geçici Hal Sonlu Eleman Analizi

Metin VARAN<sup>a,\*</sup> İsmail ÖYLEK<sup>b</sup> Serkan DERELİ<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 54187, Sakarya-Türkiye

<sup>b,c</sup> Sakarya Üniversitesi, Sakarya Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Böl., 54290, Sakarya-Türkiye

\*Sorumlu yazar, e-posta: mvaran@sakarya.edu.tr, TelNo: 0264 295 5537

**ÖZET:** Senkron makineler, rotor devri ile stator devri eşit olup stator sargılarında alternatif akım, rotor sargılarında ise doğru akım bulunan ve rotor hızı senkron devirle dönen veya döndürülen elektrik makineleridir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren en temel elektrik makinesi olan senkron makineler alternatör çalışması, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren senkron makineler ise senkron motor çalışması gerçekleştirir. Mekanik enerji kaynağına göre senkron makineler, buhar türbinlerinde yüksek veya hidrolik santrallerde ise düşük devirlerde işletilebilmekte olup bu devirlerde makinenin çalışma karakteristiklerinin boşa ve değişken yük durumlarında incelenmesi sistem planlaması için önemlidir. Bu karakteristiklerin çıkarılmasında sonlu eleman analizi yöntemi kullanılarak çoklu makine parametreleri dinamik olarak değerlendirilip senkron makinelerin davranışları incelenebilir. Bu çalışma ile boyutlandırılması yapılmış 3 faz senkron bir makinenin değişken yük durumlarında verimlilik, belirlenen devirlerde indüklenen gerilim, faz akımları ve faz gerilimleri, tork miktarı gibi değerleri elektriksel açı değişimine bağlı ayrı ayrı ortaya koyulmuştur. İncelemesi yapılan makine için değişken yük ihtiyacı olan bir elektrik şebekesini besleyecek olan üretim düşünüldüğünde makine analiz sonuçlarının enerji üretim planlanmasında önemli bir planlama unsuru olarak kullanılabileceği söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler** – 3FSG, değişken yük, sonlu eleman analizi, geçici durum analizi, Ansys Maxwell

## Transient State Finite Element Analysis for Variable Load States of a Three-Phase Synchronous Machine

**ABSTRACT:** Synchronous machines are electric machines with alternating current in stator windings, direct current in rotor windings and rotating or rotating synchronously with rotor speed. Alternators are the most basic synchronous electric machines that convert mechanical energy into electrical energy, while synchronous motors are synchronous machines that convert electrical energy into mechanical energy. According to the mechanical energy source, synchronous machines can be operated at high speeds in steam turbines or at low speeds in hydraulic power plants and it is important for system planning to study the working characteristics of the machine in no-load and variable load situations at these cycles. In the derivation of these characteristics, multi-machine parameters can be evaluated dynamically and the behaviors of synchronous machines can be examined by using the finite element analysis method. In this study, the efficiency of a 3-phase synchronous machine with variable load, induced voltage, phase currents, phase voltages and torque amounts at specified cycles are presented separately according to the electrical angle change. It can be said that the analysis results can be used as an important planning element in the energy production planning when it is considered that the machine under review is used in the production, which will feed an electric grid, which requires variable load.

**Keywords** – 3-PSG, variable load, finite element analysis, transient analysis, Ansys Maxwell

## 1. Giriş

Senkron generatörler, birkaç kVA'dan yüzlerce MVA'ya kadar farklı güç seviyelerinde üretilen ve genel olarak yüksek kapasiteli güç üretimi için kullanılan elektrik makineleridir (Bayram ve ark., 2017). Yapıları ve kapasiteleri büyük olduğu için maliyetlerinin yüksek oluşu dezavantaj gibi görünse de verimli çalışmaları avantajlı yönlerindedir (Ong,1998; Caner, 2006). Milinden aldığı mekanik enerjiyi 1 fazlı ya da 3 fazlı alternatif gerilime dönüştüren senkron generatörler serbest, özel veya kendi kendine uyarım metotları ile çalıştırılabilirler. Endüvi ve endüktör olmak üzere iki temel parçadan oluşan senkron generatör düşük güç üretecekse endüvi dönen kısımda bulunurken yüksek güç üretecek olan generatörlerin endüktörleri dönen kısımda yer alacak şekilde tasarlanır. Senkron generatörler, genel kullanım olarak yüksek güç üretim tesislerinde tercih edildikleri için endüvi bölümüne stator, endüktör bölümüne ise rotor adı verilir (Öner ve ark., 2008; Chapman, 2005). Sistem planlaması için makinenin çalışma karakteristiklerinin boşa ve değişken yük durumlarında incelenmesi önemlidir. Bu karakteristikleri çıkararak senkron makinenin davranışlarını incelemek için analitik ve sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılmış olup 3 fazlı çıkık kutuplu senkron bir generatörün değişken yük durumlarında verimlilik, belirlenen devirlerde indüklenen gerilim, faz akımları ve faz gerilimleri, tork miktarı gibi değerleri elektriksel açı değişimine bağlı olarak ayrı ayrı ortaya koyulmuştur.

## 2. Materyal ve Yöntem

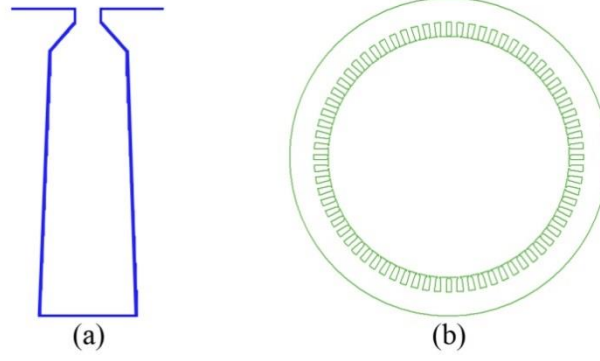
İncelemesi yapılan üç faz senkron generatöre ait tasarım detayları Çizelge 1'de verilmiştir. Senkron generatöre ait analizler bu değerlere göre analitik ve sonlu elemanlar yöntemine göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

**Çizelge 1.** Üç fazlı senkron generatörün etiket değerleri

*Table 1. Tag values of three-phase synchronous generator's*

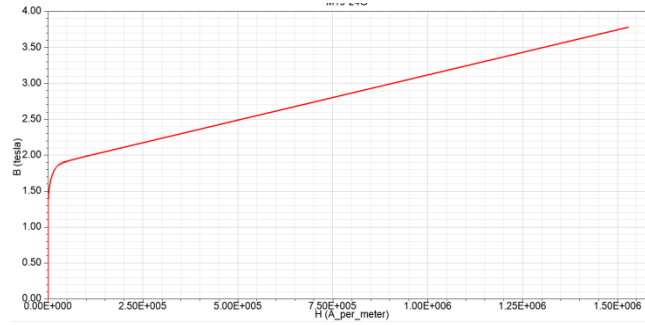
Parametre	Değer	Birim
Nominal Görünür Güç	538	kVA
Güç Faktörü	0.80	-
Kutup Sayısı	6	Adet
Nominal Gerilim	400	Volt
Faz Sayısı	3	Faz
Sargı Türü	Yıldız	-
Sürtünme Kayıpları	2600	W
Uyarım Akımı	35	Amper
Çalışma Devir	1000	d/dak
Çalışma Sıcaklığı	115	C

Şekil 1'de incelemesi yapılan senkron generatöre ilişkin M19-24G çelikten tasarlanmış stator oluk yapısı ve statora ait kesit görüntüsü gösterilmiştir.



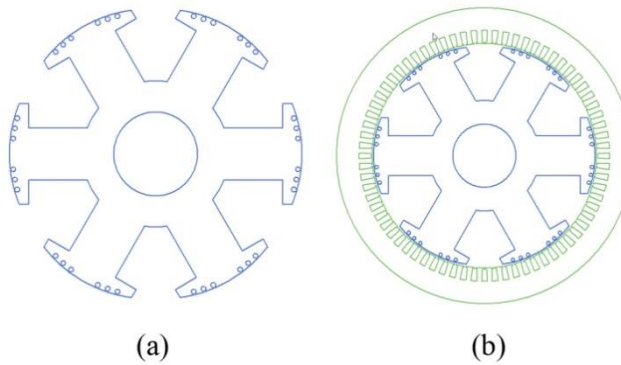
**Şekil 1. (a) Statora ait oluk yapısı (b) Stator kesit görünümü**  
**Fig. 1. (a) Gutter structure of the stator (b) Stator section view**

Stator gövdesinin tasarlandığı M19-24G çeliğine ait BH karakteristiği Şekil 2’de verilmiştir.



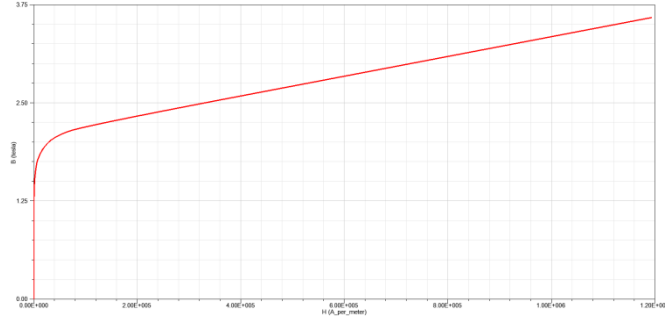
**Şekil 2. M19-24G çelik BH Karakteristiği**  
**Fig. 2. M19-24G steel BH Characteristic**

Şekil 3’de incelemesi yapılan senkron generatöre ilişkin 1008 çelikten tasarlanmış rotor yapısı ve rotoru yerleşik stator kesiti gösterilmiştir.



**Şekil 3. (a) Rotor yapısı (b) Rotoru yerleşik stator kesit görünümü**  
**Fig. 3. (a) Rotor structure (b) Rotor built-in stator section view**

Rotoru çıkık kutup olarak tasarlanan senkron generatörde meydana gelecek streslerin üstesinden gelmek için stres dayanımı yüksek 1008 çelik kullanılmıştır.



**Şekil 4.** 1008 Çelik BH karakteristiği

**Fig. 4.** 1008 Steel BH Characteristic

1008 çelikten tasarlanmış olan rotora ilişkin BH karakteristiği Şekil 4’de verilmiştir. Görüldüğü gibi 1008 çeliğin manyetik alan yoğunluğu (kuvvet) artınca çok hızlı bir şekilde manyetik akı yoğunluğu artmakta ve doyuma gitme bölgesi şekilde görülmeyecek kadar uzak bir manyetik alan yoğunluğu değerinde oluşur.

**Çizelge 2.** Tasarlanan makinenin doymamış empedans karakteristikleri

**Table 2.** The unsaturated impedance characteristics of the designed machine

Parametre	Değer	Birim	p.u
Armatür R1 Direnci	0.007384	Ohm	0.02483
Armatür X1 Reaktansı	0.035476	Ohm	0.11929
Xad d-Eksenli Reaktansı	0.758203	Ohm	2.54946
Xaq q-Eksenli Reaktansı	0.353809	Ohm	1.18968
Xad+X1 d-Eksenli Reaktansı	0.793680	Ohm	2.66875
Xaq+X1q-Eksenli Reaktansı	0.389285	Ohm	1.30897
Rf Alan Sargısı Direnci	2.179620	Ohm	0.00361
Xf Alan Sargısı Reaktansı	0.085988	Ohm	0,28916
d-Eksenli Damper Reaktansı	0.036490	Ohm	0,12270
d-Eksenli Damper Direnci	0.029392	Ohm	0,09884
q-Eksenli Damper Reaktansı	0.015370	Ohm	0,05168
q-Eksenli Damper Direnci	0.014053	Ohm	0,04725

$E_{ad}$  = d eksenli armatür reaksiyonu gerilimi,

$E_{aq}$  = q eksenli armatür reaksiyonu gerilimi olmak üzere, her bir faza ait armatür reaksiyonu gerilimi statordaki akım ile doğru orantılı olduğundan ve stator akımından  $90^\circ$  geri bulunduğundan, armatür reaksiyonu gerilimi şu şekilde yazılabilir;

$$E_{ad} = -jX_{ad}I_d \quad (1)$$

$$E_{aq} = -jX_{aq}I_q \quad (2)$$

Burada  $X_{ad}$  = d eksenli faz başı armatür reaktansı,  $X_{aq}$  = q eksenli faz başı armatür reaktansı statorda endüklenen toplam gerilim uyarım alanından ve bu d-qarmatür reaksiyonu geriliminin toplamına eşit olup;

$$E' = E_f + E_{ad} + E_{aq} \quad (3)$$

veya

$$E' = E_f - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $E'$  gerilimi çıkış gerilimi ve armatür direnci ve reaktansından meydana gelen gerilim düşümlerinin toplamına eşit olup,

$$E' = V + R_a I_a + jX_1 I_a \quad (5)$$

$I_a$  armatür akımı  $d$  ve  $q$  olmak üzere iki bileşene ayrılmış olup birisi  $E_f$  ile aynı fazda olup diğeri ile arasında 90 derece faz farkı vardır.

Eğer  $I_q, E_f$  ile aynı fazda ve  $I_d, E_f$ 'den 90° geride ise (6) denklemi yazılabilir.

$$I_a = I_d + I_q \quad (6)$$

(4) ve (5) nolu denklemleri birleştirirsek

$$E_f = V + R_a I_a + jX_1 I_a + jX_{ad} I_d + jX_{aq} I_q \quad (7)$$

elde edilir.

(6) ve (7) nolu denklemleri birleştirirsek

$$\begin{aligned} E_f &= V + R_a (I_d + I_q) + jX_1 (I_d + I_q) + jX_{ad} I_d + jX_{aq} I_q \\ &= V + R_a (I_d + I_q) + j(X_1 + X_{ad}) I_d + j(X_1 + X_{aq}) I_q \end{aligned} \quad (8)$$

denklemini elde edilir.

Şimdi de (9) ve (10) kabullerini yaparak,

$$X_a = X_1 + X_{ad} \quad (9)$$

$$X_q = X_1 + X_{aq} \quad (10)$$

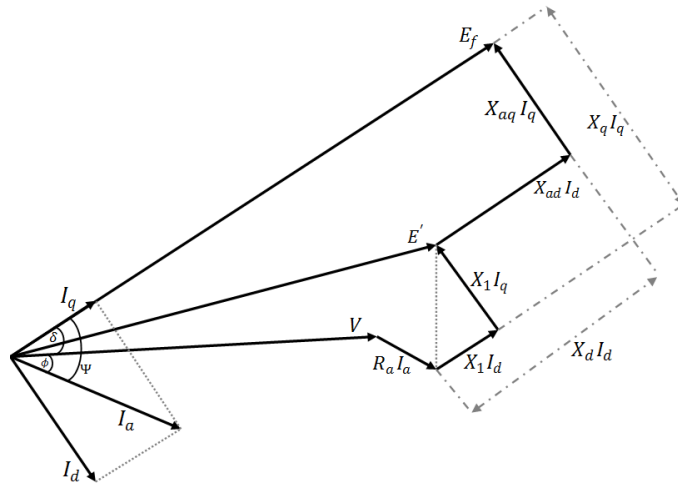
(8) (9) ve (10) birleştirilirse;

$$E_f = V + R_a I_d + R_a I_q + jX_d I_d + jX_q I_q \quad (11)$$

$$E_f = V + R_a I_a + jX_d I_d + jX_q I_q \quad (12)$$

(11) ve (12) nolu ifadeler elde edilir.

Bu denklemler çıkık kutuplu senkron generatörün nihai gerilim denklemleridir. Şekil 5'de çıkık kutuplu senkron generatöre ait tam fazör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5. Senkron generatöre ait tam fazör modeli diyagramı

Fig. 3. Synchronous generator's full phasor model diagram

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Analitik Yönteme Göre Analiz

6 kutuplu senkron generator, nominal 1000 d/dak ve 50 Hz frekansta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tablo 2 ve Tablo 3’de incelemesi yapılan çıkık kutuplu senkron generatörün stator, rotor ve damperine ilişkin boyutlar verilmiştir.

**Çizelge 3.** Tasarlanan makinenin statoruna ait karakteristikler  
**Table 3.** Characteristics of the stator of the designed machine

Parametre	Değer	Birim
Dış Çap	736.6	mm
İç Çap	558.8	mm
Uzunluk	395	mm
Slot Sayısı	72	Adet
Slot Başı İletken Sayısı	10	Adet
Damar Sayısı	9	Adet
İletken Çapı	1.63	mm
Hs0	0.76	mm
Hs1	2.17	mm
Hs2	29.4	mm
Bs0	3.9	mm
Bs1	11.4	mm
Bs2	15	mm

**Çizelge 4.** Tasarlanan makinenin rotoruna ait karakteristikler  
**Table 4.** Characteristics of the rotor of the designed machine

Parametre	Değer	Birim
Dış Çap	551.7	mm
İç Çap	160	mm
Uzunluk	395	mm
Kutup Ayak Genişliği	189.5	mm
Kutup Ayak Yüksekliği	36.6	mm
Kutup Gövde Genişliği	99.1	mm
Kutup Gövde Yüksekliği	110	mm
Kutup Başı İletken Sayısı	190	Adet
Kutup Başı Damper Slot Sayısı	6	Adet

Ansys Maxwell RMXprt döner makine aracı kullanılarak Tablo 4’de tasarlanan makinenin kütle ve malzeme karakteristikleri elde edilmiştir.

**Çizelge 5.** Tasarlanan makinenin kütle ve malzeme karakteristikleri  
**Table 5.** Mass and material characteristics of the designed machine

Parametre	Değer	Birim
Armatür Bakır Ağırlığı	102.187	kg
Alan Sargısı Bakır Ağırlığı	165.34	kg
Armatür Nüve Çelik Ağırlığı	352.663	kg

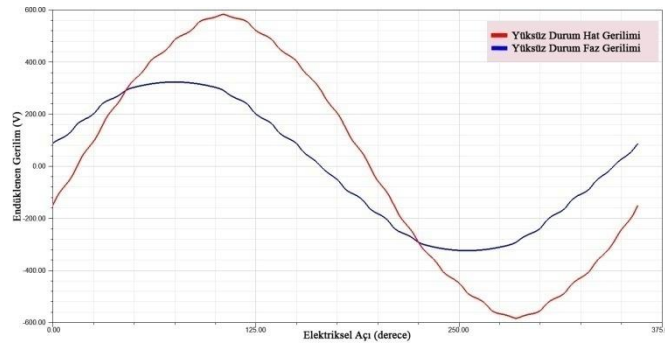
Rotor Nüve Çelik Ağırlığı	191.849	kg
Damper Çubuğu Ağırlığı	10.6962	kg
Damper Halka Ağırlığı	5.62733	kg
<b>Toplam Net Ağırlık</b>	<b>929.368</b>	<b>kg</b>

**Çizelge 6.** Çıkış karakteristikleri  
**Table 6.** Output characteristics

Parametre	Değer	Birim
<b>Demir Kayıpları</b>	<b>1229.6</b>	<b>Watt</b>
Stator Dişi Nüve Kayıpları	370.491	Watt
Stator Yoke Nüve Kayıpları	855.18	Watt
<b>Mekanik Kayıplar</b>	<b>2600</b>	<b>Watt</b>
Sürtünme Kayıpları	2600	Watt
Hava Sürtünme Kayıpları	0	Watt
<b>İlave Kayıplar</b>	<b>2690</b>	<b>Watt</b>
<b>Bakır Kayıpları</b>	<b>16686.4</b>	<b>Watt</b>
Armatür Bakır Kayıpları	13359.1	Watt
Alan Sargısı Bakır Kayıpları	2661.8	Watt
Uyartım Sargısı Kayıpları	665.45	Watt
<b>TOPLAM KAYIP</b>	<b>23206</b>	<b>Watt</b>
Giriş Gücü	555.962	kW
Çıkış Gücü	532.756	kW
Verimlilik	95.826	%

Çıkık kutuplu senkron generatöre ait analitik çözüm sonuçları Ansys Maxwell RMxprt döner makine aracı kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 6’da ise tasarlanan senkron generatörün çıkış karakteristikleri listelenmiştir. Kayıplar tablo aracılığıyla ayrı ayrı görülebilmektedir.

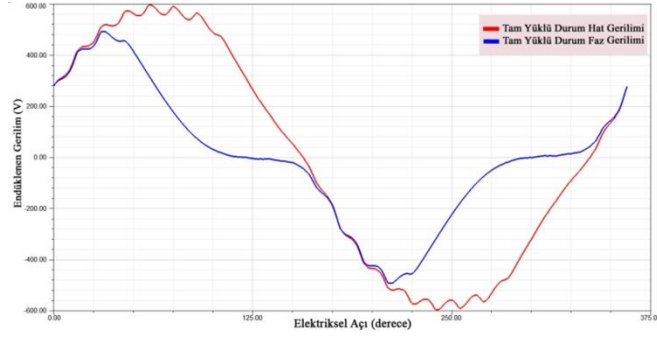
Nominal yük durumu için yapılan analitik hesaplamalarda faz gerilimi 230.94 V, faz akımı 776.536 A, uyartım akımı 34.946 A ve uyartım gerilimi 76.168 V analizlerde güç faktörü 0.990254, güç faktörü açısı  $8.00597^\circ$  ve güç açısı  $46.9672^\circ$  olarak elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Yüksüz durum armatür gerilimi değişimi  
**Fig. 6.** No-load state change of armature voltage

Şekil 6’da senkron generatörün yüksüz durumda rotor pozisyonuna göre yıldız bağlı armatürde endüklenen faz ve hat gerilimleri değişimi verilmiştir. Yüksüz durumda faz

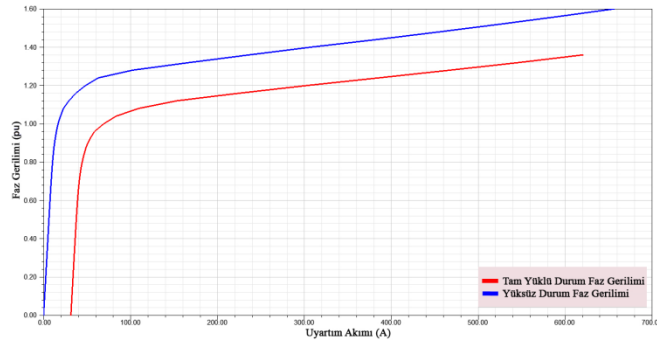
gerilimi toplam harmonik bozulmasının %2.342, hat gerilimi tarafında %1.970 olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 7.** Tam yüklü durum armatür gerilimi değişimi

**Fig. 7.** Fully loaded state luminaire voltage change

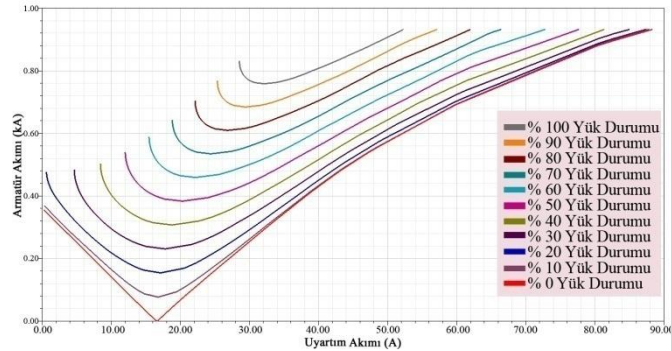
Şekil 7’de senkron generatörün tam yük durumda rotor pozisyonuna göre yıldız bağlı armatürde endüklenen faz ve hat gerilimleri değişimi verilmiştir. Tam yüklü durumda faz gerilimi toplam harmonik bozulmasının %37.744, hat gerilimi tarafında %4.192 olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 8.** Faz gerilimi – Uyarım akımı grafiği

**Fig. 8.** Phase voltage - Amplification current chart

Şekil 8’de senkron generatörün tam yüklü ve yüksüz durumda uyarım akımına bağlı yıldız bağlı armatürde endüklenen per-unit faz gerilimleri değişimi verilmiştir. Boşta çalışmada 20 A ve tam yük durumunda ise 52A’lık bir uyarım ile armatürün çok hızlı bir şekilde nominal çıkışı verebileceği gösterilmiştir. Bu durum generatörün verimlilik grafiğinde de açık bir şekilde görülmektedir.

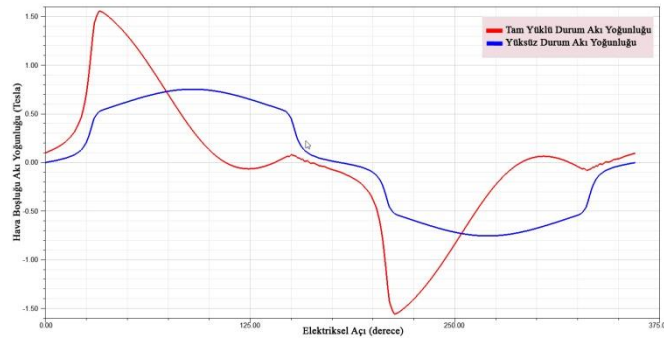


**Şekil 9.** Uyarım akımı – Armatür akımı grafiği

**Fig. 9.** Excitation current - Armature current chart



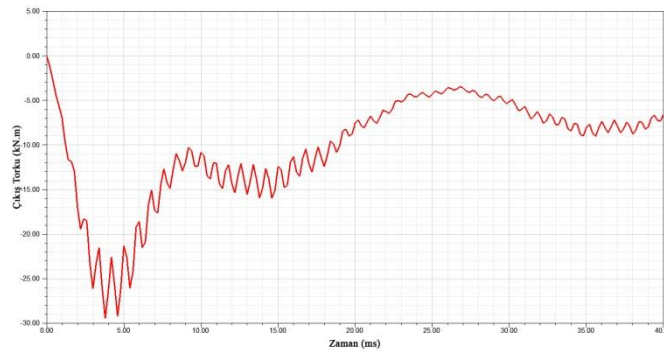
Senkron bir makinede uyartım akımı ile üretilen aktif güç miktarını değiştirmeden sadece güç faktörü değiştirilebilir. Belirlenen kararlılık limitlerinde bu değişikliğin yapılması oldukça önemlidir. Şekil 9’da senkron generatörün farklı yüklenme durumları için uyartım akımına bağlı yıldız bağlı armatürde meydana gelen per-unit faz akımları değişimi (V eğrisi) verilmiştir. Yüksüz durum için eğrinin keskin bir V yaptığı görülmektedir. Yüksüz durum için uyartım akımı artsa bile armatür akımı sıfır oluncaya kadar azalma göstermektedir. Uyartımın düşük ve yüksek olduğu tüm yük durumları için armatür akımının yüksek olduğu görülmektedir. Farklı seviyede yük durumları için aynı seviyede uyartım akımlarında armatür akımının geniş bir yelpazede değiştiği görülmektedir. Yapılan uyartımla birlikte güç faktörünün de değişimi görülmektedir. Aşırı uyartım durumu için generatör geri güç faktörlü olarak, düşük uyartım durumu için ileri güç faktörlü olarak çalışacaktır. Birim güç faktörünün ( $pf=1$ ) olduğu durum en düşük armatür akımının çekildiği durumdur.



**Şekil 10.** Hava boşluğu akı yoğunluğu

**Fig. 10.** Air space flux density

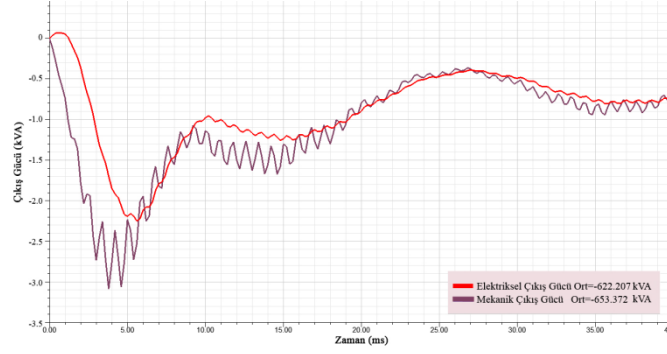
Şekil 10’da senkron generatörün tam yük ve yüksüz durumda hava boşluğu akı yoğunluğunun rotor pozisyonuna göre değişimi verilmiştir. Yüksüz durumda hava boşluğu akı yoğunluğunun toplam harmonik bozulmasının %13.439 olduğu tespit edilmiştir. Boşta çalışmada akı yoğunluğu düşük kalırken tam yük durumunda yoğunluğun 1.61 T seviyesine çıkabileceği gösterilmiştir.



**Şekil 11.** Elektriksel çıkış torkunun zamana göre değişimi

**Fig. 11.** Electrical output torque change with time

Şekil 11’de senkron generatörün 0.8 geri güç faktörü durumunda zamana bağlı olarak çıkış torkunun değişimi gösterilmiştir. Elektriksel çıkış torkunun ortalama değer -5087,45 N.m değerinde olduğu görülmüştür.



**Şekil 12.** Elektriksel ve mekanik çıkış gücünün zamana göre değişimi

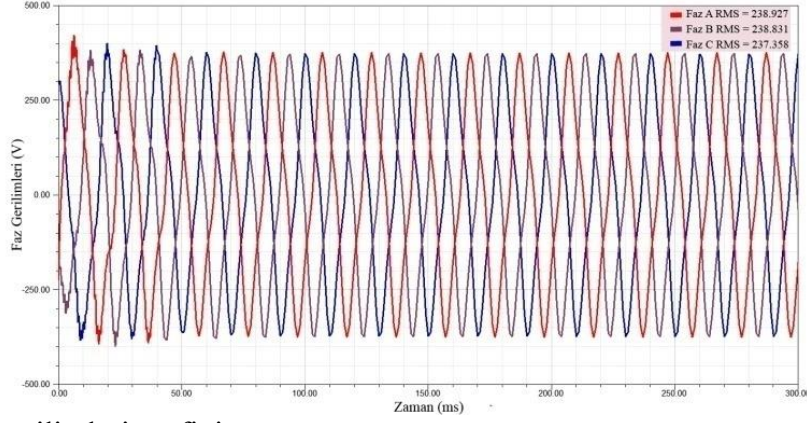
**Fig. 12.** Electrical and mechanical output power change with time

Şekil 12’de senkron generatörün 0.8 güç faktörü durumunda zamana bağlı olarak elektriksel ve mekanik çıkış güçlerinin değişimi gösterilmiştir. Elektriksel çıkış gücünün ortalama değer -622.207 kVA değerinde olduğu görülmüştür. Ortalama verimliliğin %95.826 olduğu hesaplanmıştır.

### 3.2. Sonlu Eleman Yöntemi İle Analiz

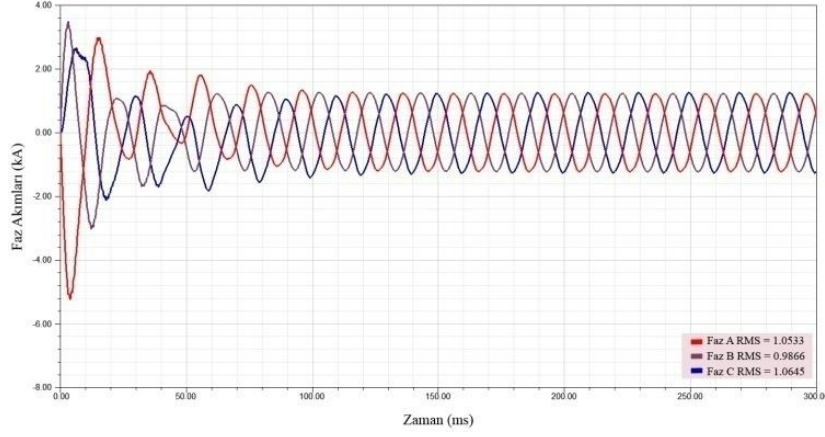
Analitik yöntemlerle çözümü karmaşık ve zor olan ve lineer olmayan malzeme özellikleri kullanılarak sistemi daha küçük alt parçalara bölmek suretiyle çözüme ulaşma yöntemine Sonlu Eleman Analizi (SEA) denilmektedir(Hendershot ve ark., 1994). İlk olarak 1950’li yıllarda uçak gövdesi tasarımında kullanılan bu metot 1970’li yıllardan sonra generatör, transformatör ve motor gibi elektrik makinelerinin analizinde de yoğun olarak tercih edilmiştir(Kalenderli, 1995; Brauer, 1981). Sonlu eleman metodu lineer olmayan malzemelerin tanımlanabilmesi ve karmaşık fiziksel parçaları kolay modelleyebilmesi gibi özelliklerinden dolayı elektrik makinelerinin analizinde tercih edilen sayısal yöntemlerin başında gelir(Williamson ve ark, 1990).

Sonlu Eleman Metodu (SEM) kullanılarak yapılan Maxwell denklemlerine dayalı elektromanyetik alan hesabı, elektrik makinelerinin yüksek doğrulukta modellenmesi için kullanılan en uygun tekniktir. Bu teknik diğer yöntemlere göre oldukça uzun zamanda hesaplama yapmaktadır. Yapılan SEM analizlerinde yer değiştirme akımlarının olmadığı kabul edilerek makinenin manyeto-statik ve manyeto-dinamik değerlendirmeleri yapılır(Cros, 2016; Fitouri ve ark., 2016). Senkron generatörün analizinde 2 boyutlu yakınsama yapılmıştır. Yapılan yakınsamada makineye ait kesitlerin aksel olarak değişmediği kabul edilmiştir. Manyetik vektör potansiyelinin sadece z yönünde değiştiği kabul edilmiştir. SEM analizlerinde rotorun dönmesi ve doğrusal olmayan manyetik malzemeye ve katı iletkenlere ilişkin B(H) eğrileri baz alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Analizde iletkenlerin birbirine elektriksel olarak belirtilen bağlantı türlerinde bağlı olduğu baz alınmıştır. Tüm iletkenlerdeki akımlar ve kayıplar ayrı ayrı hesaplanmıştır. Rotorun elektriksel açı olarak adlandırılan pozisyonuna göre tork hesapları ve manyetik kayıplar Maxwell gerilmeleri ile hesaplanmıştır. Zamana bağlı SEM analizleri 1ms sabit adım zamanı için 300 ms boyunca 0,0001 adım aralığında Geri Euler sayısal yöntemi yapılmıştır. İletkenler sargılar, rotor, stator, uyartım ve damper için iletken bakır olarak seçilmiştir. Harici devre damper çubuklarını, kontak dirençlerini ve kısa devre halkasını temsil eden sabit dirençlerle birleştirir.



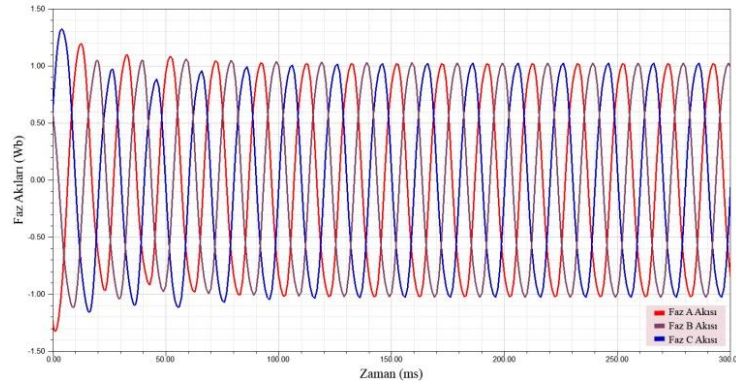
**Şekil 13.** Faz gerilimleri grafiği  
**Fig. 13.** Phase voltage graph

Şekil 13’de SEM’e göre analizi yapılan senkron generatörün 0.8 geri güç faktörü durumunda zamana bağlı faz gerilimlerinin değişimi gösterilmiştir.



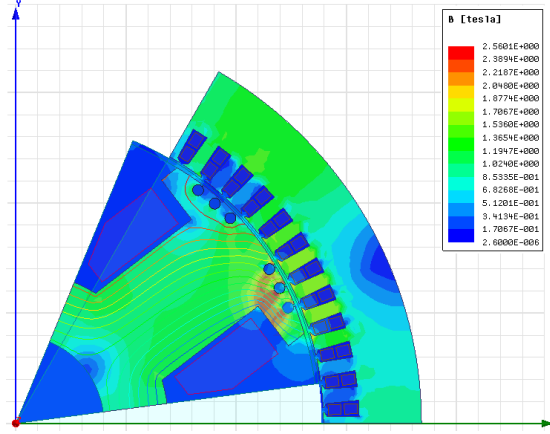
**Şekil 14.** Faz akımları – Zaman grafiği  
**Fig. 14.** Phase currents - Time graph

Şekil 14’de senkron generatörün 0.8 geri güç faktörü durumunda zamana bağlı faz akımlarının değişimi gösterilmiştir.



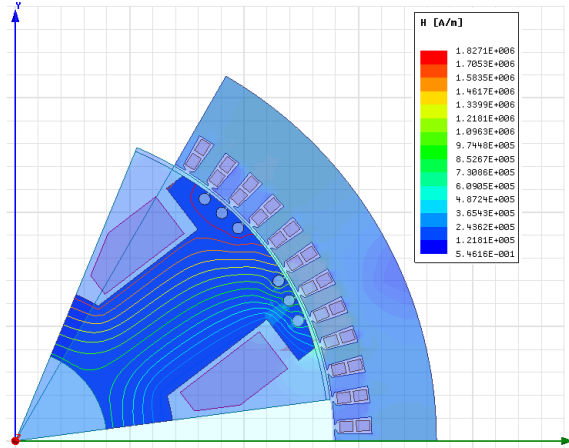
**Şekil 15.** Faz akıları – Zaman grafiği  
**Fig. 15.** Phase fluxes - Time graph

Şekil 15’de senkron generatörün 0.8 geri güç faktörü durumunda zamana bağlı faz akı değişimi gösterilmiştir.



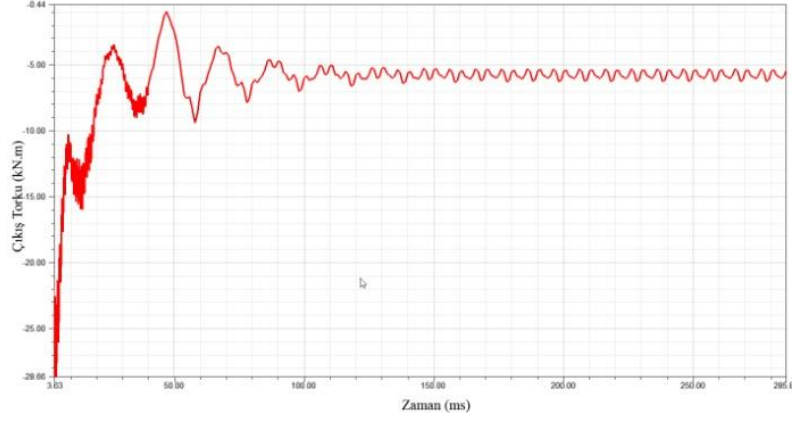
**Şekil 16.** Manyetik akı yoğunluğu değişimi  
**Fig. 16.** Magnetic flux intensity change

Şekil 16'da senkron generatörün 1/6 kesiti için manyetik akı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir. Rotorun damper sargılarına yakın kutuplarında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu makinede doyma etkileri meydana getirebilecektir.



**Şekil 17.** Manyetik alan çizgileri değişimi  
**Fig. 17.** Change of magnetic field lines

Şekil 17'de senkron generatörün 1/6 kesiti için manyetik alan çizgileri değişimi gösterilmiştir. Rotorun damper sargılarına yakın kutuplarında meydana gelen manyetik alan çizgileri yoğunluğu makinede doyma etkileri meydana getirebilecektir.



**Şekil 18.** Senkron generatörün zamana bağlı çıkış torku

**Fig. 18.** Time-dependent output torque of the synchronous generator

Şekil 18’de senkron generatörün 0.8 geri güç faktörü durumunda zamana bağlı çıkış torku değişimi gösterilmiştir. Tork değerinin 5087,45 N.m ortalama değerinde değişim gösterdiği görülmektedir.

Mekanik enerji kaynağına göre senkron makineler, buhar türbinlerinde yüksek veya hidrolik santrallerde ise düşük devirlerde işletilebilmekte olup bu devirlerde makinenin çalışma karakteristiklerinin boşa ve değişken yük durumlarında incelenmesi sistem planlaması için önemlidir. Bu karakteristiklerin çıkarılmasında analitik ve sonlu eleman analizi yöntemleri kullanılarak çoklu makine parametreleri dinamik olarak değerlendirilebilir. Yapılacak analizlerle senkron generatör tasarımı yapılırken çeşitli sınır koşulları altında analitik ve sonlu eleman sayısal yöntemleri kullanılarak optimizasyon yapılabilmesi mümkündür.

#### 4. Sonuç

Bu çalışma ile boyutlandırılması yapılmış 3 faz senkron bir makinenin değişken yük durumlarında verimlilik, belirlenen devirlerde indüklenen gerilim, faz akımları ve faz gerilimleri, tork miktarı gibi değerleri elektriksel açı değişimine bağlı olarak ayrı ayrı ortaya koyulmuştur. İncelemesi yapılan makine için değişken yük ihtiyacı olan bir elektrik şebekesini besleyecek olan üretim düşünüldüğünde makine analiz sonuçlarının enerji üretim planlanmasında önemli bir planlama unsuru olarak kullanılabileceği söylenebilir.

#### Kaynaklar

- Bayram M.B., Sefa I. ve Balcı S., 2017. A static exciter with interleaved buck converter for synchronous generators. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2017), 17760-17770.
- Brauer J.R., 1981. Finite Element Analysis of Single-Phase and Polyphase Induction Motors. Conf. Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia.
- Caner M., 2006. Hiyerarşik fuzzy yöntemiyle senkron generatörlerde uyarım kontrolü, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enst./YTU, İstanbul, Türkiye.
- Chapman S., 2005. *Electric machinery fundamentals*. Tata McGraw-Hill Education.
- Cros J., et al., 2016. Simulation Methods for the Transient Analysis of Synchronous Alternators. *Renewable Energy-Utilisation and System Integration*, InTech.
- Fitouri M., et al., 2016. Analysis and co-simulation of permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault by finite element method. *Systems, Signals & Devices (SSD)*. 13th International Multi-Conference on. IEEE, 472-477, Germany.

- Gani A., et al. 2015. Uyarlamalı Bulanık-PI Denetim Esaslı Dinamik Senkron Kompanzatör ile Reaktif Güç Kompanzasyonu Benzetim Çalışması. Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 18(2), 72-76.
- Hendershot J.R. & Miller T.J.E.,1994. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics Pub.
- Kalenderli Ö., 1995. *Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları*. İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- Ong, C. M. M. O. 1998. *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*. Prentice-Hall PTR.
- Öner Y., Özçira S., Bekiroğlu K.N., 2008. Düşük Güçlü Uygulamalar için Konvansiyonel Senkron Generatörler ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Karşılaştırılması. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008), 277-281, Bursa, Türkiye.
- Williamson S., Lim L.H. & Robinson M.J., 1990. Finite-element models for cage induction motor analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, 26(6), 1007-1017.