



## HAVA ARAÇLARI İÇİN DEĞİŞKEN AKILI RELÜKTANS GENERATÖR TASARIMI

Hilmi GÜRLEYEN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Değişken Akıllı Relüktans  
Generatör 1,  
Elektrifikasyonu Artırılmış  
Hava Aracı 2,  
Generatör Tasarımı 3,  
Sonlu Eleman Analizi 4.*

### Öz

Elektrifikasyonu artırılmış hava araçlarında generatör önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada hava araçları için değişken akıllı relüktans generatör (DARG) tasarımı yapılmıştır. Öncelikle hava araçlarında kullanılan değişken hızlı-değişken frekanslı elektrik üretim mimarisi anlatılmıştır. 12/10 topolojiye sahip bir DARG'ın elektromanyetik özellikleri analiz edilmiş ve dinamik denklemleri verilmiştir. Dinamik denklemlerden yararlanarak tam yük altında ve 0,85 geri güç faktöründe çalışabilmesini sağlayacak endüktans değerlerini elde etmek amacıyla yöntem geliştirilmiştir. Hesaplanan toplu parametrelere göre 5kW gücünde 12/10 DARG tasarımı yapılmıştır. Tasarım ve analiz sırasında Ansys/Maxwell'den yararlanılmıştır. Tasarım yapılan generatörün terminal geriliminin harmonik analizi yapılmış ve bozulma faktörünün %2,16 olduğu görülmüştür. Yapılan analizler neticesinde, 12/10 DARG'ın üç seviyeli senkron generatöre alternatif olabilecek, daha ucuz ve daha basit bir generatör olduğu görülmüştür.

## VARIABLE FLUX RELUCTANCE GENERATOR DESIGN FOR AIRCRAFT

### Keywords

*Variable Flux Reluctance  
Generator 1,  
More Electric Aircraft 2,  
Generator Design 3,  
Finite Element Analysis 4.*

### Abstract

The generator plays a significant role in more electric aircraft (MEA). In this paper, variable flux reluctance generator (VFRG) is designed for aircraft. A brief overview of airplane electric power generation using variable speed-variable frequency is given firstly. The electromagnetic properties of 12/10 VFRG is analyzed and its dynamic equations are given. Using dynamic equations, a method has been developed to determine inductance values that will allow it to operate under full load and 0.85 lagging power factor. Lumped parameters are obtained the machine to operate at full-load and 0.85 lagging power factor by using phasor diagram. On the basis of the calculated lumped parameters, a 5kW 12/10 VFRG has been designed. Ansys/Maxwell is used to design and analyze. Using a harmonic analysis, distortion factor of terminal voltage is determined as 2.16 %. As a result of the analysis an alternative to the three-level generator is the 12/10 VFRG, which is less expensive and has simple structure.

### Alıntı / Cite

Gürleyen, H., (2023). Hava Araçları İçin Değişken Akıllı Relüktans Generatör Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2), 824-836.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Gürleyen, 0000-0002-3920-9712

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	09.02.2022
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	06.02.2023
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	04.04.2023
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	28.06.2023

\* İlgili yazar / Corresponding author: hilmi.gurleyen@usak.edu.tr, +902762212121-2784

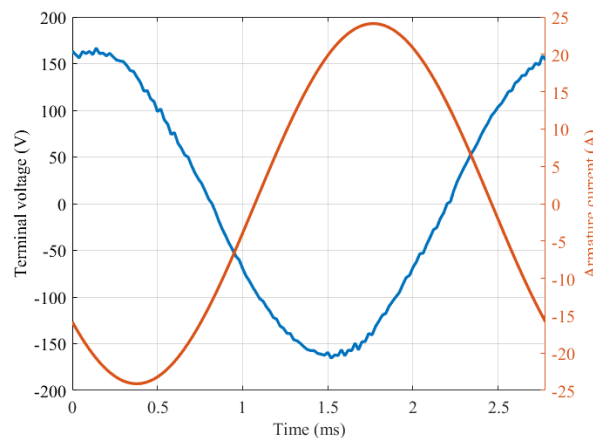
# ARTICLE TITLE VARIABLE FLUX RELUCTANCE GENERATOR DESIGN FOR AIRCRAFT

Hilmi GÜRLEYEN,  
Uşak University

## Highlights

- Dynamical equations of VFRG are obtained, and the power production mechanism is investigated.
- The lumped parameters of VFRG are determined for variable speed-variable frequency systems.
- A 5kW VFRG is designed based on the lumped parameters using Ansys/Maxwell.
- The distortion factor of the terminal voltage is kept under 2.16%.

## Graphical Abstract



**Figure.** Variation of terminal voltage and current at rated power

## Purpose and Scope

This study aims to design a 5 kW VFRG for variable speed variable frequency system for aircraft. In order to speed up the design process, an analytical method is proposed to obtain lumped parameters of VFRG.

## Design/methodology/approach

A generator must operate under inductive load for variable speed variable frequency systems. However, terminal voltage decreases under inductive load. In order to regulate terminal voltage at rated voltage, armature self-inductance and mutual inductance between armature and field windings must be designed properly. Using d- and q- axis model of the VFRG, inductances are determined at full-load and 0.85 lagging power factor that is the worst case to regulate terminal voltage. A 5 kW VFRG is designed according to the calculated inductances using Ansys/Maxwell. Stator teeth and rotor pole width are optimized to decrease distortion factor of the terminal voltage.

## Findings

Synchronous generators are used commonly for aircraft applications. To eliminate brush, a three-level synchronous generator is used. In this paper, a 5 kW VFRG is designed for variable speed variable frequency systems for aircraft as a competitor with the synchronous generator. A novel analytical model is presented with the objective of expediting the design process of VFRG. In a VFRG, the absence of brushes is a notable feature since the field winding is located in the stator. Thus, the VFRG offers a simpler structure in comparison to a synchronous generator. With its low distortion factor of the terminal voltage, a VFRG is well-suited for utilization in variable speed variable frequency systems. The robust structure of the rotor enables a VFRG to function reliably even in harsh environments. Additionally, the VFRG serves as a fail-safe generator as the field winding can be de-energized during faults. Despite structural similarities with a switched reluctance, the VFRG has a low torque ripple.

## Originality

This paper proposes a VFRG design that has more simple structure than a three-level synchronous generator for aircraft applications. A 5 kW VFRG is designed using the proposed design procedure.

## 1. Giriş (Introduction)

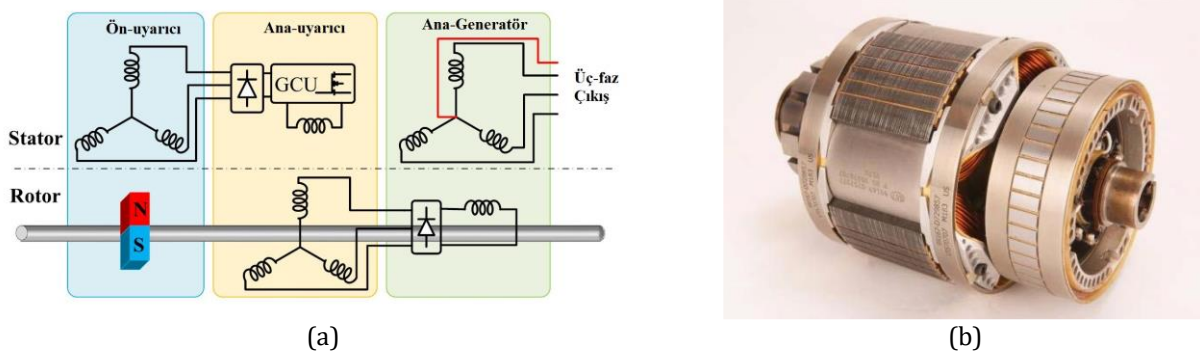
Elektrifikasyonu artırılmış hava araçları kavramı ile hava araçlarında bulunan havalandırma, hareket sistemleri ve ısıtma sistemleri gibi mekanik, hidrolik ve pnömatik sistemler yerine mümkün olduğunca elektriksel sistemlerin kullanılması amaçlanır. Boeing 787 ve Airbus A-380, elektrifikasyonu artırılmış hava aracı uygulamalarına başarılı birer örnektir (Sarlıoğlu ve Morris, 2015). Elektrifikasyonun artmasıyla birlikte generatör güç değerleri de artmaktadır. Geniş gövdeli sivil uçaklarda elektrik gücü 1MW civarındadır (Madonna vd, 2018; Nøland vd, 2020).

Hava araçlarında kullanılan elektrik makinalarının arıza durumlarındaki davranışları önemlidir. Arıza durumlarında diğer sistemlere zarar vermeden, arıza durumunun yönetilmesi gerekmektedir. Senkron generatörlerin uyarma sargı akımları kontrol edilebildiği için kısa devre hatası olması durumunda uyarma akımı düşürülerek generatörün zarar görmesi engellenir (Sayed vd, 2021).

Şekil 1’de gösterildiği üzere, hava araçlarında genellikle üç seviyeli senkron generatör tercih edilmektedir (Wang vd, 2020). Üç seviyeli yapı; ön uyarıcı, ana uyarıcı ve ana generatörden oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde fırçaların kullanımına ihtiyaç kalmamaktadır. Ön-uyarıcı yapının rotorunda mıknatıs bulunmaktadır. Mıknatısların dönmesiyle statorunda alternatif akım (AA) oluşur. İndüklenen gerilim doğru akım (DA)’ya dönüştürülür ve ana-uyarıcının statorunda bulunan uyarma sargısı beslenir. Ana-uyarıcının rotorunda ise armatür sargıları bulunur. Ana uyarıcının rotor sargılarında indüklenen AA gerilim, DA’ya doğrultularak ana generatörün rotorunda bulunan DA uyarma sargısı beslenir. Sonrasında ise ana generatörün statorunda bulunan armatür sargılarında indüklenen gerilim ile hava aracının elektriksel sistemleri beslenir.

Günümüz generatör sistemlerinin marş motoru olarak da çalışması beklenmektedir. Türbin motorunun büyük eylemsizliğini yenebilmek için motor çalışmada yüksek moment üretilmesi gerekmektedir. Düşük hızlarda ön uyarıcıda indüklenen gerilim genliğinin düşük olması motor çalışmadaki maksimum moment değerini sınırlamaktadır. Motor çalışmadaki moment değerinin artırılmasına dönük çalışmalar (Griffo vd, 2013) tarafından yapılmıştır. Senkron generatörler için önemli olan tasarım parametrelerinden biri de toplam harmonik bozulmanın düşük olmasıdır. (Wang vd, 2022) tarafından yapılan çalışmada toplam harmonik bozulma düşürülmüştür.

Kalıcı mıknatıslı senkron makineler, yüksek verim ve güç yoğunluklarına sahip olmalarından dolayı hibrit/elektrikli araç uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu özellikler hava araçlarında da önemli bir kriter olmasına rağmen kalıcı mıknatıslı senkron generatörler hava araçlarında tercih edilmemektedir. Çünkü olası bir kısa devre hatası durumunda mıknatısların enerjisi kesilemediği için çok yüksek akımlar oluşmakta ve hava aracı için tehlike oluşturmaktadır. Bu yüzden hata akımlarını sınırlamaya dönük çalışmalar yapılmıştır (Geest vd, 2015; Atkinson vd, 2006).



Şekil 1. a) Üç seviyeli senkron generatör yapısı ve b) rotoru (Wang vd, 2020). (a) Structure of three-level synchronous generator b) rotor)

Anahtarlamalı relüktans generatör (ARG); yüksek hız ve yüksek sıcaklık gibi zorlu şartlarda çalışabilmesi, hata-toleransının yüksek olması gibi önemli özelliklere sahiptir (Valdivia vd, 2013; Ferreria vd, 1995). Fakat moment dalgalığının yüksek olması dezavantajdır.

Asenkron generatör ise hava aracı uygulamaları için bir diğer alternatiftir (Jia ve Rajashekara, 2017). Hava araçları için çift beslemeli asenkron generatör uygulaması yapılmıştır (Feehally ve Apsley, 2015). Çift beslemeli asenkron generatöre benzemesine rağmen rotor sargılarının statora taşınmasıyla elde edilen yeni bir generatör (Peng vd, 2022) tarafından tasarlanmıştır.

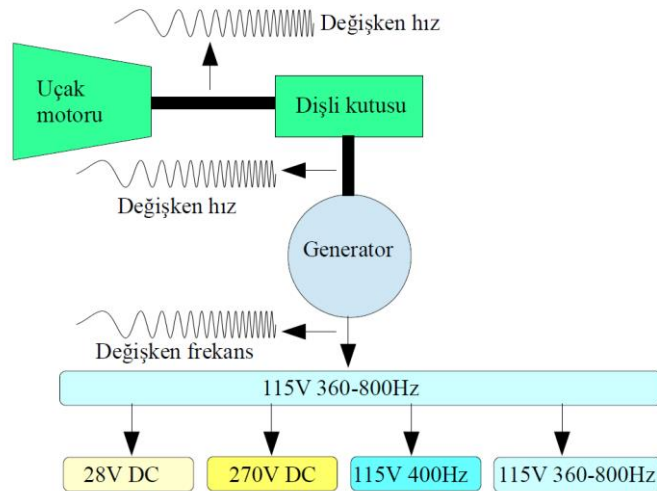
Hibrit ve elektrikli hava araçları üzerine çalışmalar (Sirimanna vd, 2022; Barzkar vd 2022) tarafından özetlenmiştir. Bu uygulamalarda kullanılan generatör veya elektrik motorunun güç yoğunluğunun çok yüksek olması gerektiği için süper iletkenli elektrik makinaları kullanılmaktadır (Adu-Gyamfi vd, 2022; Bird, 2021; Fard vd, 2022).

Hava araçları uygulamalarında çift çıkıntılı ve çift beslemeli generatöre ilgi son yıllarda artmaktadır (Chen vd, 2012; Zhang vd, 2012; Cai vd, 2022). Çift çıkıntılı ve çift beslemeli generatörün terminal gerilimi sinüzoidal olmadığı için armatür sargılarında indüklenen gerilim pasif veya aktif doğrultular kullanılarak DA gerilime dönüştürülür (Zhao vd, 2018; Xu vd, 2020; ). Hava araçlarında generatör olarak kullanıldığında nüve kayıpları (Jia vd, 2020; Zhang vd, 2022) tarafından analiz edilmiştir. Dinamik modellemesi ise (Yanwu vd, 2019) tarafından verilmiştir.

Bu çalışmada, değişken hızlı-değişken frekanslı elektrik üretim mimarileri için değişken akıllı relüktans generatör (DARG) tasarımı yapılmıştır. DARG'da hem armatür sargıları hem de uyarma sargıları statorunda bulunmaktadır. Böylece fırçalardan kurtulmak için senkron generatörün ihtiyacı olan üç seviyeli yapıya gerek kalmamakta ve daha kompakt bir generatör tasarlanmaktadır. Ayrıca arıza durumunda uyarma akımının kesilebilmesi sayesinde yüksek hata akımlarından korunmaktadır. Rotor yapısı ARG'ye benzemesine rağmen, zıt-EMK dalga şekli sinüzoidaldir. Bu sebeple, moment dalgalılığı da düşüktür. Çift çıkıntılı ve çift beslemeli generatörün de hem armatür hem de uyarma sargıları statorunda olmasına rağmen zıt-EMK'sı çift harmoniklere sahip olduğu için değişken hızlı-değişken frekanslı sistemler için uygun değildir. Kompakt bir yapıya sahip olması, terminal geriliminin sinüzoidal olması, arıza durumunun yönetilebilmesi, moment dalgalılığının düşük olması ve basit bir rotora sahip olması DARG'ın önemli avantajlarıdır. Bu çalışmanın ikinci kısmında değişken hızlı değişken frekanslı sistem tanıtılmıştır. Üçüncü kısmında ise DARG'ın elektromanyetik analizi verilmiştir. Dördüncü kısımda tasarım sonuçları Ansys/Maxwell yardımı ile elde edilmiştir. Beşinci kısımda ise sonuç verilmiştir.

## 2. Değişken Hızlı Değişken Frekanslı Elektrik Üretim Mimarisi (Electrical Power Generation Architecture of Variable Speed Variable Frequency)

İlk hava araçlarında, elektrik gücü haberleşme sistemlerinde kullanılmıştır. Sonrasında aydınlatma ve ısıtma sistemlerinde de kullanılmasıyla beraber elektrik gücüne talep artmıştır. Elektrik gücüne talebin artmasıyla birlikte, kablo kayıplarını ve kablo ağırlığını düşürmek amacıyla gerilim seviyesi de artmıştır (Zhang vd, 2017). Önceleri DA olarak üretilen elektrik enerjisi, sonrasında AA olarak üretilmiştir. Birçok hava aracında 400 Hz, 115V mimari kullanılmıştır. Hidro-mekanik bir sistem kullanılarak türbin motorunun değişken hızı sabit hıza dönüştürülerek generatör miline bağlanır. Böylece generatörün sabit frekansta gerilim indüklemesi sağlanır. Sonraları güç elektroniğinin gelişmesiyle birlikte değişken frekanslı sistemlere geçilmiştir. Değişken frekanslı sistemlerin verimi sabit frekanslı sistemlere nazaran daha yüksektir (Whyatt ve Chick, 2012).



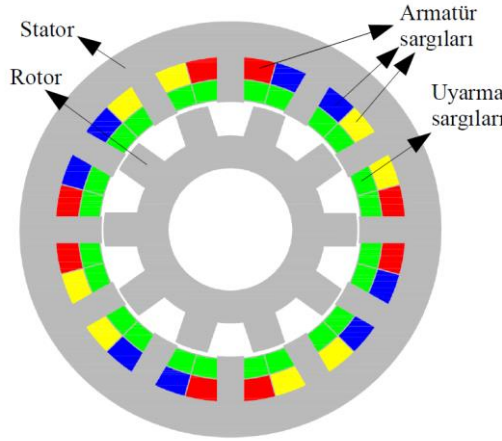
**Şekil 2.** Hava araçlarında kullanılan değişken hızlı-değişken frekanslı elektrik üretim mimarisi (Architecture of bus power system for variable speed variable frequency system in aircraft).

Şekil 2'de hava araçlarında kullanılan, değişken hızlı-değişken frekanslı elektrik üretim mimarisi gösterilmektedir. Uçak motoru ile generatör bir dişli kutusu üzerinden mekanik olarak bağlanmaktadır. Motor hızının değişmesi, generatör hızının da değişmesine neden olmaktadır. Generatör hızının değişimiyle birlikte indüklenen gerilimin frekansı da değişmektedir. Üretilen gerilimin frekansı değişirken genliği uyarma akımı değiştirilerek sabit

tutulmaktadır. Bazı yükler değişken frekanslı 115V ile doğrudan çalışabilirken bazı yükler için 115V-400Hz, bazıları için ise 270V DA ve aviyonik sistemler için ise 28V DA kullanılır.

### 3. Değişken Akılı Relüktans Generatörün Analizi (Analysis of Variable Flux Reluctance Generator)

DARG için farklı oluk/kutup topolojileri bulunmaktadır. 6/4 topolojisinde dengesiz gerilimler, 6/5 ve 6/7 topolojilerinde ise rotor kutup sayılarının tek olmasından dolayı dengesiz manyetik kuvvetler oluşmaktadır (Huang, vd, 2018; Liu, ve Zhu, 2014). Sinüzoidal bir zıt-EMK'ya sahip olan ve manyetik kuvvetlerin dengeli olduğu en düşük rotor kutup sayısına sahip topoloji 12 oluk ve 10 kutuplu topolojidir. Şekil 3'te, 12 oluk ve 10 kutuplu (12/10) DARG yapısı verilmiştir. Bu makinelerde armatür sargılarının yanı sıra uyarma sargıları da statorda bulunmaktadır. Rotor yapısı ise ARG'ye benzemektedir. Statorda bulunan uyarma sargıları sayesinde, armatür sargılarında sinüzoidal bir gerilim indüklenmektedir.



Şekil 3. 12/10 DARG yapısı (The structure of 12/10 VFRG)

Tasarım parametreleri Tablo 1'de verilen bir 12/10 DARG'ın armatür sargısı öz-endüktansı, armatür sargıları arasındaki karşit endüktans, uyarma sargısı öz-endüktansı ve armatür ile uyarma sargısı arasındaki karşit endüktansların değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Armatür ve uyarma öz-endüktanslarının değişimi oldukça sınırlıdır. Armatür ile uyarma sargısı arasındaki karşit endüktans ise sinüzoidal olarak değişmektedir. Öz-endüktanslarının yaklaşık olarak sabit olması makinenin relüktans momenti üretmediğini göstermektedir. DARG yapısı itibarıyla her ne kadar ARG'ye benzese de moment üretme prensibi bakımından silindirik rotorlu senkron makineye benzemektedir. Makinenin d-q eksenindeki dinamik denklemleri ise (1-4)'te verilmiştir.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + L_{mf} \frac{di_f}{dt} - \omega_e i_q L_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (i_d L_d + i_f L_{mf}) \quad (2)$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + \frac{3}{2} L_{mf} \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

$$T = p \frac{3}{2} i_q L_{mf} i_f \quad (4)$$

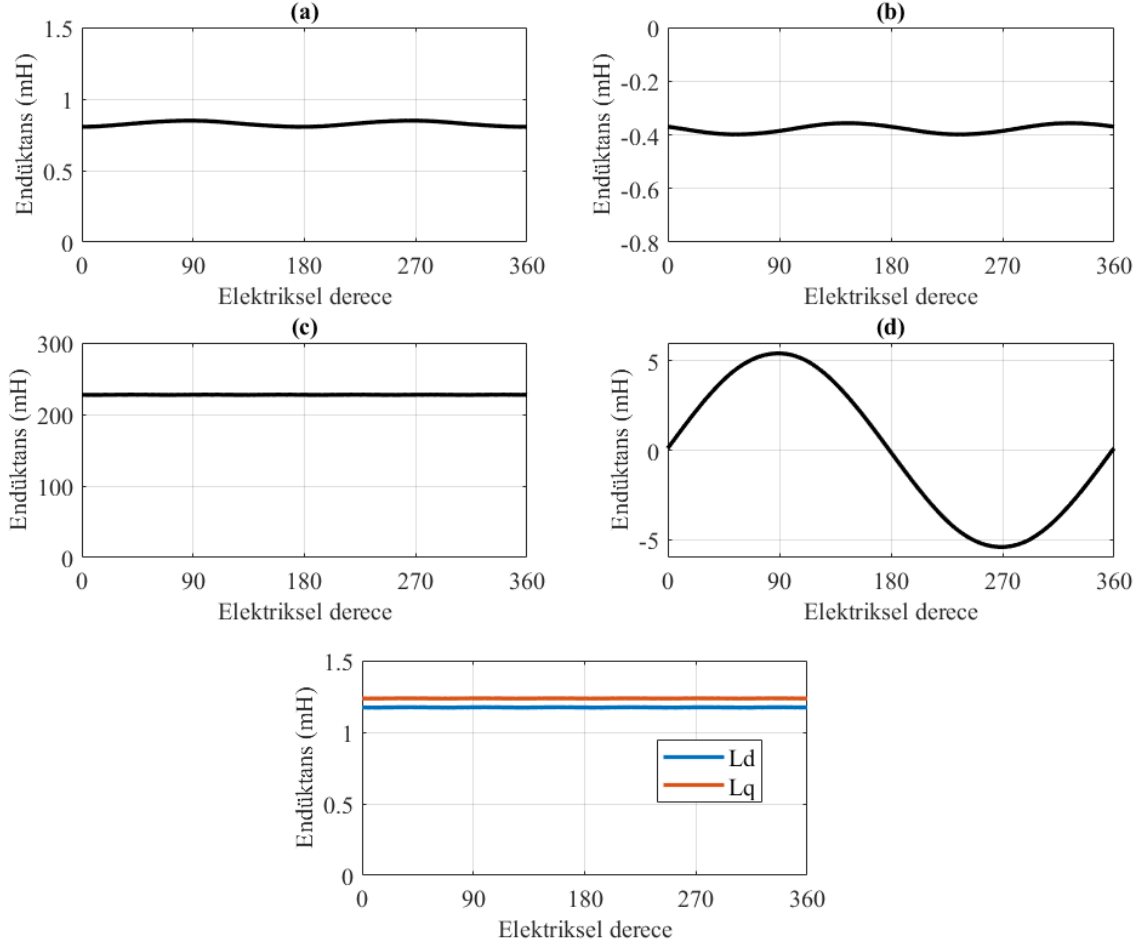
Bu denklemlerde;  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $i_d$  ve  $i_q$  sırasıyla d- ve q- eksen gerilim ve akımlarını,  $V_f$  ve  $i_f$  ise uyarma sargısı gerilim ve akımını,  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $L_f$  ve  $L_{mf}$  ise d- ve q- eksen endüktansları, uyarma öz-endüktansı ve armatür ile uyarma sargısı arasındaki karşit endüktansı göstermektedir.  $L_{mf}$ , temel bileşenin genliği olarak alınmaktadır.  $T$  ise elektromanyetik momenti ve  $p$  ise kutup çifti sayısını göstermektedir.

$$P = 3 \left[ \frac{EV}{X_d} \sin\delta + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin\delta \right] \quad (5)$$

Generatör tarafından üretilen elektriksel güç ifadesi denklem 5'te verilmiştir. Denklem 5'te gösterilen  $E$ , zıt-EMK iken  $V$  ise terminal gerilimidir.  $X_d$  ve  $X_q$ , d- ve q- eksen empedansları,  $\delta$  ise zıt-EMK ile terminal gerilimi arasındaki

açı olup, güç açısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği üzere, d- ve q- eksenli endüktans değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle, manyetik çıkıklık etkisinden kaynaklanan güç ihmal edilebilir. Böylece güç ifadesi denklem 6'daki gibi yazılabilir.

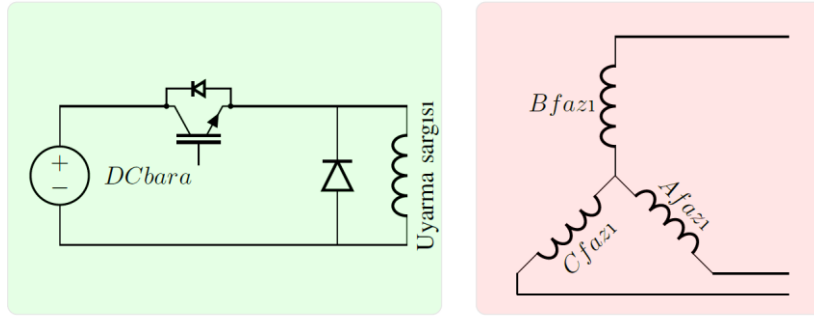
$$P = 3 \left[ \frac{EV}{X_d} \sin \delta \right] \quad (6)$$



**Şekil 4.** a) Armatür sargısı öz-endüktansı b) Armatür sargıları arası karşıt endüktansı c) Uyarma sargısı öz-endüktansı d) Armatür ve uyarma sargıları arası karşıt endüktansı e) d- ve q- endüktansları (a) Self-inductance of armature winding, b) mutual inductance between armature windings c) self-inductance of field winding d) mutual inductance between armature and field windings, e) d- and q- axis inductance.)

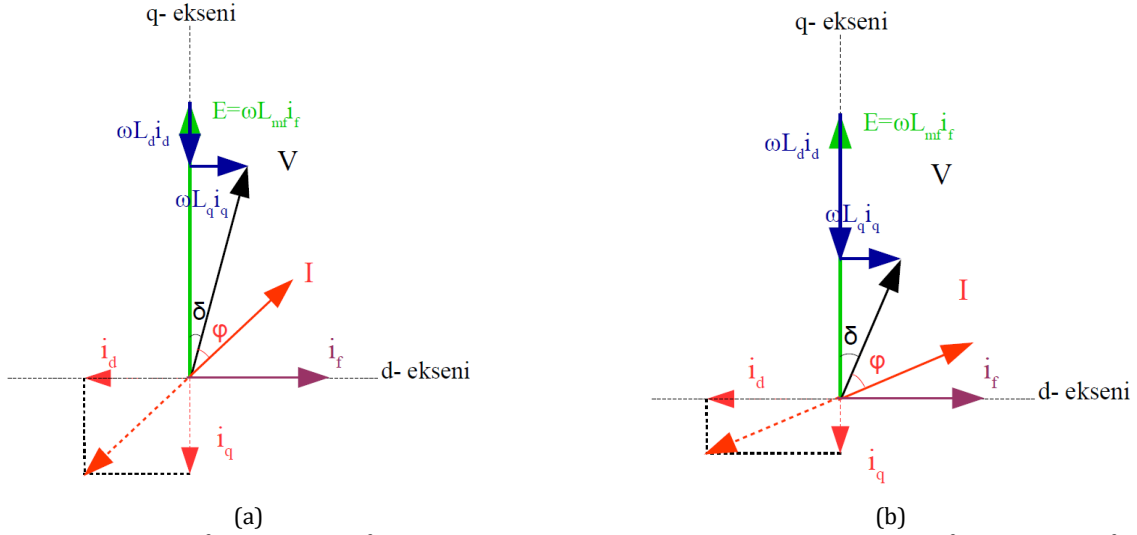
#### 4. 12/10 VFRG Tasarımı

Değişken hızlı-değişken frekanslı mimariler için tasarlanan bir DARG'ın terminal bağlantı şeması Şekil 5'te verilmiştir. Terminal uçlarında indüklenen gerilimin bir kısmı doğrudan yüklerle verilirken bir kısmı da 115V 400Hz, 28V DA ve 270V DA değerlerine dönüştürülür. Uyarma sargısına bağlanan bir DA kıyıcı devresi ile terminal gerilimin kontrolü yapılır ve generatör farklı hızlarda çalışsa bile gerilimin genliği sabit tutulur. Generatör mil hızının yanı sıra generatöre bağlanan yükler de terminal gerilimine etki eder. Armatür sargılarından çekilen akımın genliği ve faz açısı terminal gerilimini etkiler. (M. Standard, 2004)'a göre generatörün 0,85 geri güç faktöründe de çalışabilmesi gerekmektedir.

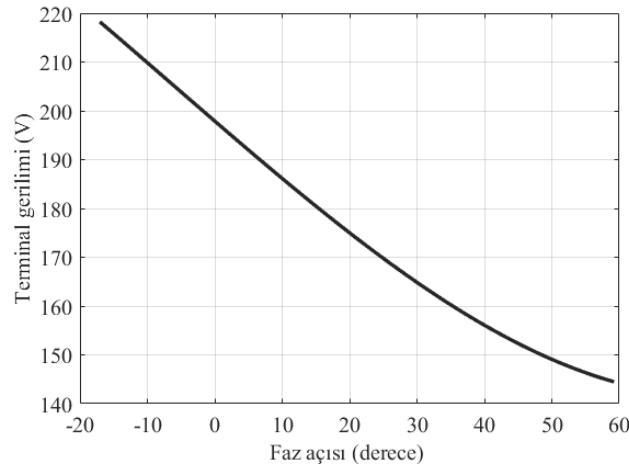


Şekil 5. 12/10 DARG sargı bağlantıları (Winding connection of 12/10 VFRG).

Generatörün endüktif yüklenmesi durumu tasarım için dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Endüktif yük arttıkça terminal gerilimi azalmaktadır. Bu durumu göstermek amacıyla Şekil 6'da aynı uyarma ve armatür akımlarına sahip olan fakat faz açısının  $31,78^\circ$  ve  $43,78^\circ$  olduğu durumlara ait fazör diyagramları verilmiştir. Fazör diyagramında generatör sargılarının iç direnci ihmal edilmiştir. Faz açısının artmasıyla birlikte terminal geriliminin azaldığı görülmektedir. Denklem 1-3'ten yararlanarak faz açısının değişmesiyle terminal gerilim genliğinin değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'de uyarma ve armatür akım değerleri anma değerlerinde sabit tutulmuştur. (M. Standard, 2004)'a göre 0,85 geri güç faktöründe çalışırken etiket terminal geriliminin sağlanması gerekmektedir. Endüktif yük altında etiket terminal gerilimini istenilen değerde tutabilmek için uygun  $L_{mf}$  ve  $L_d$  değerlerinin seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 6. a)  $\varphi = 31,78^\circ$ , b)  $\varphi = 43,78^\circ$  iken fazör diyagramı (Phasor diagram with a)  $\varphi = 31,78^\circ$ , b)  $\varphi = 43,78^\circ$ )



Şekil 7. Armatür ve uyarma akımları anma değerlerinde iken faz açısına bağlı olarak terminal gerilimi değişimi (Terminal voltage variation depending on the phase angle while field and armature current are at the rated value.)

DARG'ın analitik modelinin RMxprt, Motor-Cad gibi motor tasarım programlarında olmaması tasarımı

zorlaştırmaktadır. Tasarım için sonlu eleman analizi (SEA) ile çözüm yapan programlara ihtiyaç duyulmaktadır. SEA ile çözüm ise uzun sürmektedir. Ayrıca tasarım sırasında; çap, uzunluk, stator dış genişliği, rotor dış genişliği, hava aralığı genişliği, akım yoğunluğu, armatür ve uyarma sarım sayıları gibi birçok parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Tasarım parametrelerinin değişimi sırasında zıt-EMK ile terminal gerilimi arasındaki açı değişmekte ve terminal gerilimi ile armatür akımı arasındaki faz farkı da değişmektedir. Tasarım sürecini hızlandırmak için makinanın armatür sargılarının birer akım kaynağından beslendiği düşünülerek analiz yapılır. Terminal gerilimi, elektromanyetik moment, verim vs. gibi tasarım sonuçlarının hedeflenen değerlere ulaşana kadar tasarım parametreleri değiştirilir. Armatür akımlarının zıt-EMK ile arasındaki açının belirlenmesi ile tasarlanan generatörün istenilen hedefleri sağlama durumu analiz edilir. Bu yüzden generatör tasarımı sırasında endüktans değerlerinin analitik olarak belirlenerek tasarımı hedeflenen endüktans değerlerine göre yapmak tasarım sürecini hızlandıracaktır.

Endüktans değerlerini hesaplama için ilk olarak d- ve q- eksenlerine ait akım ve gerilim ifadeleri denklem 7-10'da elde edilmiştir.

$$i_q = I_m \cos(\delta + \varphi + \pi) \quad (7)$$

$$i_d = I_m \sin(\delta + \varphi + \pi) \quad (8)$$

$$V_q = V \cos(\delta) \quad (9)$$

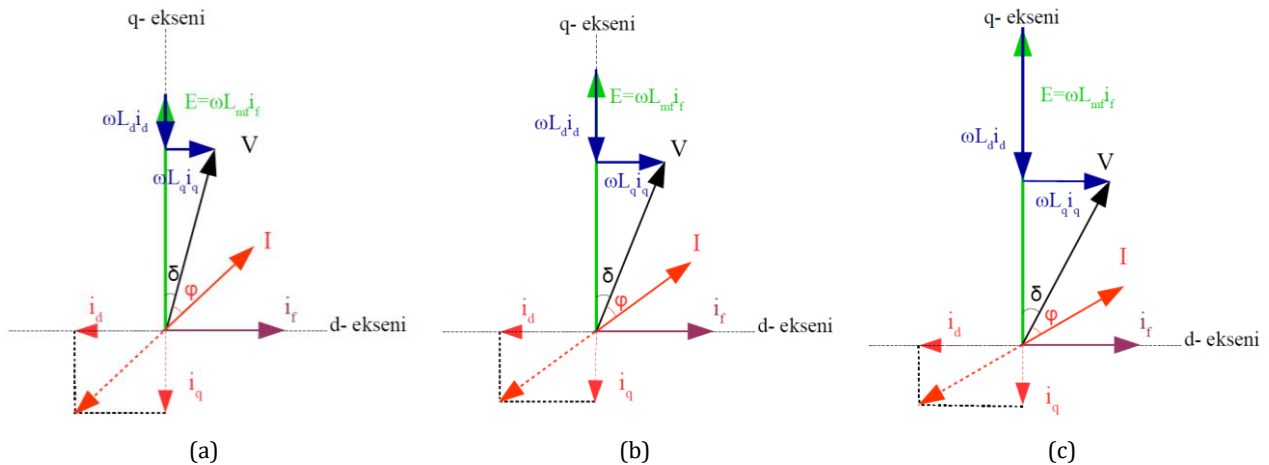
$$V_d = V \sin(\delta) \quad (10)$$

D- ve q- eksenli endüktanslarının değerleri birbirlerine yakındır. Bu yüzden d- ve q- eksenli endüktansları eşit kabul edilebilir. Geçici hal ve sargı dirençleri ihmal edilirse, d- eksenli endüktansı ile armatür ile uyarma sargıları arasındaki karşıt endüktans değerleri denklem 11 ve denklem 12 ile elde edilir.

$$L_d = \frac{V_d}{\omega i_q} \quad (11)$$

$$L_{mf} = \frac{V_q - \omega L_d i_d}{\omega i_f} \quad (12)$$

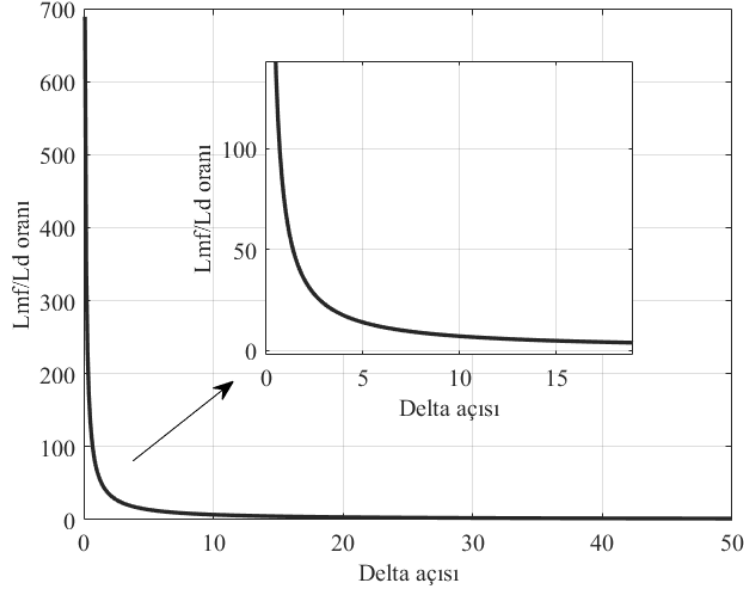
Generatörün terminal gerilimi ve faz açısı (M. Standard, 2004)'a göre belirlenmiş ve armatür akım değeri ise generatörden istenilen çıkış gücüne göre elde edilmiştir. Şekil 8'de aynı çıkış gücüne, terminal gerilimine, uyarma akımına ve armatür akımına sahip fakat farklı güç açılarında sahip tasarımların fazör diyagramları gösterilmiştir. Endüktif yük altında iken istenilen terminal gerilimini sağlamak için  $L_d$  endüktansının ve  $L_{mf}$  endüktansının uygun değerlerde olması gerekmektedir. Güç açısı hem  $L_d$  endüktansını hem de  $L_{mf}$  endüktansını belirlemektedir. Generatörün çift çıkıntılı bir yapıya sahip olması nedeniyle armatür ve uyarma sargıları arasındaki manyetik kuplaj zayıftır. Bu yüzden  $L_{mf}/L_d$  oranının çok yüksek olması durumunda uyarma sarğı sayısının çok fazla olmasına ve generatörün eksenel olarak uzamasına neden olur. Bu durumda generatörün güç yoğunluğu azalır.



Şekil 8. a)  $\delta = 15^\circ$ , b)  $\delta = 22^\circ$ , c)  $\delta = 28^\circ$  iken fazör diyagramı (Phasor diagram with a)  $\delta = 15^\circ$ , b)  $\delta = 22^\circ$ , c)  $\delta = 28^\circ$ .)

Şekil 9'da terminal gerilimi, armatür akımı ve faz açısı sabit iken güç açısının değişimiyle birlikte  $L_{mf}/L_d$  oranının değişimi gösterilmiştir.  $L_{mf}/L_d$  oranının çok yüksek olması generatörün güç yoğunluğunu düşürdüğü için  $L_{mf}/L_d$  oranının düşük olduğu bir duruma göre  $L_{mf}$  ve  $L_d$  endüktansları belirlenmiştir. Hesaplanan endüktans değerlerine göre generatör tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan generatörün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.





**Şekil 9.** Güç açısına bağlı  $L_{mf}/L_d$  oranı değişimi (Variation of  $L_{mf}/L_d$  ratio depending on power angle)

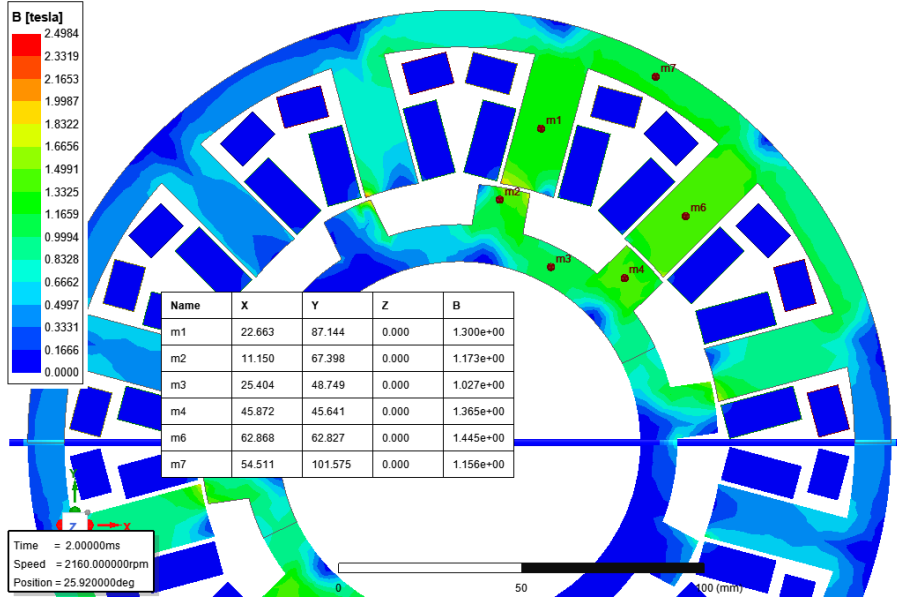
**Tablo 1.** Generatör Tasarım Parametreleri (Generator Design Parameters)

Parametreler	Değer
Elektriksel güç	5 kW
Güç faktörü	0,85 (geri)
Stator dış çapı	240 mm
Stator iç çapı	145 mm
Hava aralığı uzunluğu	1 mm
Eksenel uzunluk	340 mm
Çıkış gerilimi	115 V (rms, faz-nötr)
Akım yoğunluğu	5,5 A/mm <sup>2</sup>
Bobin başına armatür sarım sayısı	8
Bobin başına uyarma sarım sayısı	70
Çalışma frekans aralığı	360-800 Hz

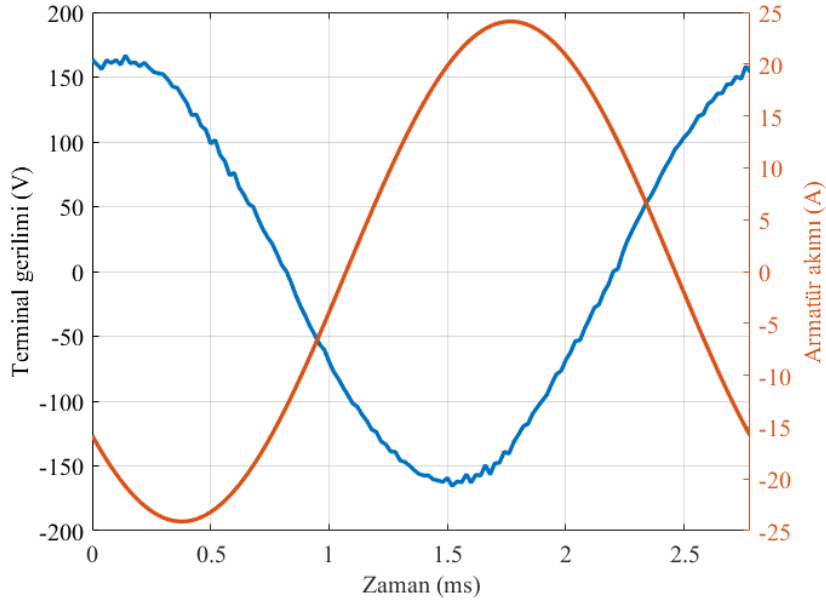
#### 4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Hedeflenen endüktans değerlerine göre generatör tasarımı Ansys/Maxwell ortamında 2 boyutlu analiz yöntemi ile elde edilmiştir. Tasarımı yapılan generatörün tam yük altında çalışması durumunda oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. 0,85 geri güç faktöründe tam yük altındaki terminal gerilimi ise Şekil 11'de verilmiştir. Değişken hızlı-değişken frekanslı sistemlerde kullanılan generatörün terminal gerilimindeki bozulma faktörünün %5'in altında olması gerekmektedir (M. Standard, 2004). Bozulma faktörünün %5'in altında kalmasını sağlamak için manyetik yüklenme düşük tutulmuştur. Şekil 10'da gösterildiği gibi manyetik akı yoğunluğu malzemenin doyuma girme akı yoğunluğunun (yaklaşık 1.8 T) altında tutulmuştur. Manyetik akı yoğunluğunun artırılması durumunda bozulma faktörü artmaktadır. Bozulma faktörü, bozulmanın temel frekansa oranı şeklinde tanımlanır ve (13)'te gösterilmiştir.

$$BF = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \quad (13)$$

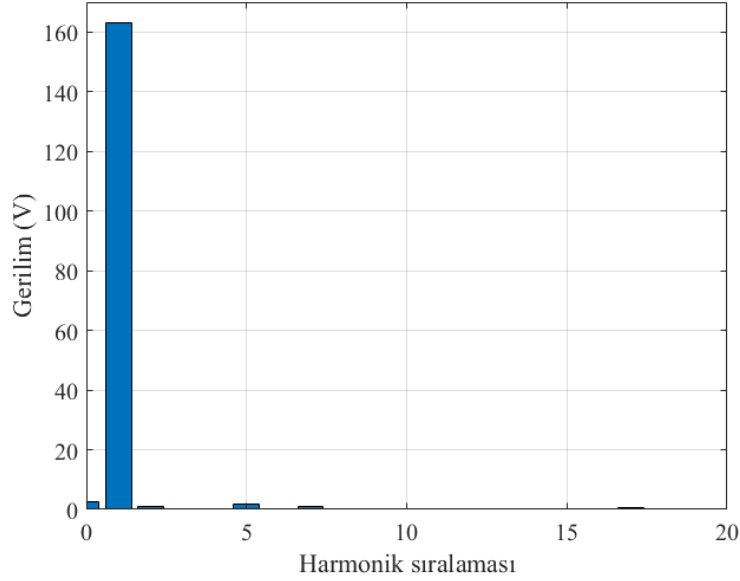


Şekil 10. Tam yük ve 0,85 güç faktöründe manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Magnetic flux density distribution at full-load and 0,85 power factor).

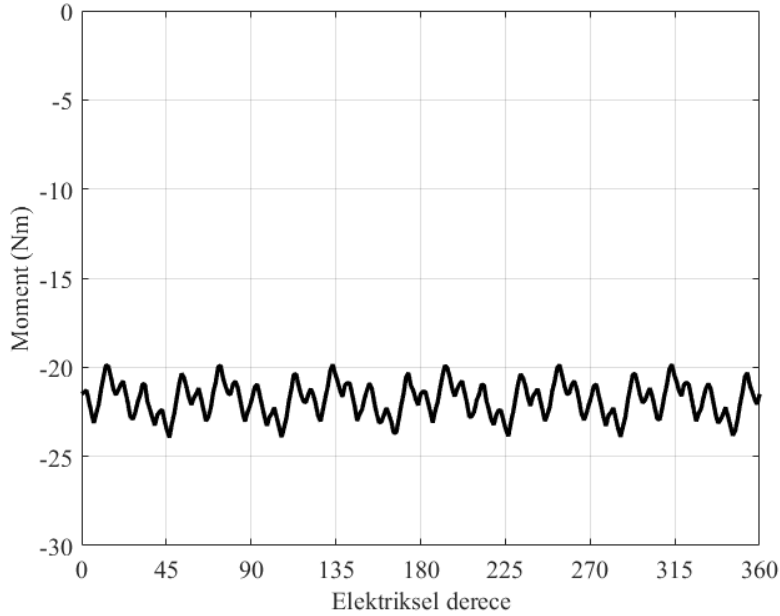


Şekil 11. Anma gücünde terminal gerilim ve akım değişimi (Variation of terminal voltage and current at rated power).

Şekil 12'de tam yük altındaki terminal geriliminin fast Fourier transform (FFT) sonucu gösterilmiştir. Temel bileşenin genliği yüksek iken harmoniklerin genliklerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Terminal geriliminin bozulma faktörü %2,16 olarak hesaplanmıştır. Bu değer (M. Standard, 2004)'a uygundur. Şekil 13'te ise generatörün tam yük altındaki elektromanyetik moment dalgalılığı verilmiştir. Moment dalgalılığı yaklaşık %17 olup, stator ve rotor dişlerinin genişliklerinin optimize edilmesi ile daha da düşürülebilir. DARG yapısal olarak ARG'ye benzese de moment dalgalılığı ARG'ye göre çok düşüktür.



Şekil 12. Terminal gerilimi harmonik bileşenleri (Harmonic components of the terminal voltage).



Şekil 13. Moment değişimi (Torque variation).

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada değişken hızlı-değişken frekanslı elektrik üretim mimarisine sahip hava araçları için 5 kW gücünde bir DARG tasarımı yapılmıştır. Öncelikle generatörün çalışma prensibi ve dinamik denklemleri verilmiştir. Daha sonrasında ise tasarımı kolaylaştırılmak için toplu parametrelerin belirlendiği bir yöntem geliştirilmiştir. Belirlenen toplu parametrelere uygun bir tasarım gerçekleştirilmiş ve tam yük altında 0,85 geri güç faktöründeki gerilim dalga şekli Ansys/Maxwell yardımıyla elde edilmiştir. Terminal geriliminin bozulma faktörünün standarda uygun biçimde %2,16 seviyesinde olduğu gözlenmiştir.

DARG ile üç seviyeli senkron generatöre alternatif daha kompakt ve daha ucuz bir tasarım elde etmek mümkündür. Rotorunda herhangi bir sargı veya mıknatıs olmaması zorlu çevre şartlarında da çalışabilmesine imkan sunmaktadır. Hata durumunda uyarma sargı akımının kesilebilmesi sayesinde yüksek hata akımlarından korunabilmesini sağlamaktadır. Rotor yapısı bakımından ARG'ye benzemesine rağmen düşük moment dalgalılığına sahip olması önemli bir üstünlüğüdür. Rotor kutup sayısının yüksek olması ise düşük hızlarda çalışmasına neden olmakta ve generatörün güç yoğunluğunun düşmesine neden olmaktadır.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Tübitak tarafından 119E219 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Atkinson, G. J., Mecrow, B. C., Jack, A. G., Atkinson, D. J., Sangha, P., Benarous, M., 2006. The Analysis of Losses in High-Power Fault-Tolerant Machines for Aerospace Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(5), 1162-1170.
- Adu-Gyamfi, B. A., & Good, C. (2022). Electric Aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering*, 100134.
- Barzkar, A., & Ghassemi, M. (2022). Components of electrical power systems in more and all-electric aircraft: A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- Bird, J. Z. (2021). A review of electric aircraft drivetrain motor technology. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 1-8.
- Cai, S., Wang, Y., Chen, H., Yuan, X., Yu, L., Zhang, Z., & Lee, C. H. (2022). Design and analysis of a doubly salient wound field starter generator for cost-effective automobile application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(7), 6900-6911.
- Chen, Z., Wang, H., & Yan, Y. (2012). A doubly salient starter/generator with two-section twisted-rotor structure for potential future aerospace application. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 59(9), 3588-3595.
- Fard, M. T., He, J., Huang, H., & Cao, Y. (2022). Aircraft Distributed Electric Propulsion Technologies-A Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- Feehally, T., & Apsley, J. M. (2015). The doubly fed induction machine as an aero generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3462-3471.
- Ferreira, C. A., Jones, S. R., Heglund, W. S., Jones, W. D., 1995. Detailed Design of a 30-kW Switched Reluctance Starter/Generator System for a Gas Turbine Engine Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(3), 553-561.
- Griffo, A., Wrobel, R., Mellor, P. H., Yon, J. M., 2013. Design and Characterization of a Three-phase Brushless Exciter for Aircraft Starter/Generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(5), 2106-2115.
- Huang, L., Zhu, Z. Q., Feng, J., Guo, S., Shi, J. X., Chu, W., 2018. Analysis of Stator/Rotor Pole Combinations in Variable Flux Reluctance Machines Using Magnetic Gearing Effect. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), 1495-1504.
- Jia, W., Xiao, L., & Zhu, D. (2020). Core-loss analysis of high-speed doubly salient electromagnetic machine for aeronautic starter/generator application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 59-68.
- Liu, X., & Zhu, Z. Q. (2014). Stator/Rotor Pole Combinations and Winding Configurations of Variable Flux Reluctance Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 3675-3684.
- Madonna, V., Giangrande, P., Galea, M., 2018. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(3), 646-659.
- Nøland, J. K., Leandro, M., Suul, J. A., & Molinas, M., 2020. High-power machines and starter-generator topologies for more electric aircraft: A technology outlook. *IEEE access*, 8, 130104-130123.
- Peng, P., Chen, L., Wang, X., Liu, R., Brugmann, A., Utt, L., ... & Xu, L. (2022). Design of A Brushless Doubly-Fed Machine for Aviation Electric Propulsion. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Sarlioglu B., Morris, C. T., 2015. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(1), 54-64.
- Sayed, E., Abdalmagid, M., Pietrini, G., Sa'adeh, N. M., Callegaro, A. D., Goldstein, C., & Emadi, A., 2021. Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4), 2976-3005.
- Sirimanna, S., Balachandran, T., Salk, N., Xiao, J., Lee, D., & Haran, K. (2022). Electric Propulsors for Zero-Emission Aircraft: Partially superconducting machines. *IEEE Electrification Magazine*, 10(2), 43-56.
- Standard, M. (2004). Aircraft electric power characteristics. Department of Defense Interface Standard (MIL-STD-704F).
- Valdivia, V., Todd, R., Bryan, F. J., Barrado, A., Lázaro, A., Forsyth, A. J., 2013. Behavioral Modeling of a Switched Reluctance Generator for Aircraft Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2690-2699.
- Van der Geest, M., Polinder, H., Ferreira, J. A., Zeilstra, D., 2015. Design and Testing of a High-Speed Aerospace Permanent Magnet Starter/Generator. In 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) (pp. 1-6). IEEE.
- Wang, Y., Nuzzo, S., Gerada, C., Zhang, H., Zhao, W., & Galea, M. (2022). Integrated Damper Cage for THD Improvements of Variable Speed Salient-Pole Synchronous Generators for the More Electric Aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(3), 3618-3629.
- Wang, Y., Nuzzo, S., Zhang, H., Zhao, W., Gerada, C., Galea, M., 2020. Challenges and Opportunities for Wound Field Synchronous Generators in Future More Electric Aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(4), 1466-1477.
- Whyatt, G. A., & Chick, L. A., 2012. Electrical Generation for More-Electric Aircraft Using Solid Oxide Fuel Cells (No. PNNL-21382). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Xu, Y., Zhang, Z., Bian, Z., & Yu, L. (2020). Dynamic performance improvement of doubly salient brushless DC generator system with controlled rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(10), 8209-8218.

- Yanwu, X. U., Zhang, Z., Li, Y. U., & Yuke, S. H. I. (2019). Behavior and functional modeling methods of doubly salient electromagnetic generators for aircraft electrical power system applications. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(2), 477-488.
- Zhang, Z., Huang, J., Jiang, Y., Geng, W., & Xu, Y. (2017). Overview and analysis of PM starter/generator for aircraft electrical power systems. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 1(2), 117-131.
- Zhang, Z., Tao, Y., & Yan, Y. (2012). Investigation of a new topology of hybrid excitation doubly salient brushless DC generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(6), 2550-2556.
- Zhao, Y., Wang, H., Li, D., & Qian, R. (2018). Comparative research of a wound-field doubly salient generator with different rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), 4851-4863.
- Zhang, J., Zhu, X., Zhang, Z., & Xia, Y. (2022). AC Loss Calculation and Analysis of Hollow Conductor for Doubly Salient Brushless DC Generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(8), 1-5.