

T.C
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**PENÇE KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLERİN DOĞRUSAL
OLMAYAN YÜKLENME KOŞULLARINDA PERFORMANS
ANALİZİ**

YUSUF TOPRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Murat Erhan BALCI (Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Serhat DUMAN
Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ

BALIKESİR, TEMMUZ- 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Peñçe Kutuplu Senkron Generatörlerin Doğrusal Olmayan Yükleme Koşullarında Performans Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yusuf TOPRAK

(İmza)

ÖZET

PENÇE KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLENME KOŞULLARINDA PERFORMANS ANALİZİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUSUF TOPRAK

**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)**

BALIKESİR, TEMMUZ - 2023

Pençe kutuplu senkron makine, düşük maliyeti, sağlam rotor yapısı ve imalat kolaylığı avantajlarından dolayı, içten yanmalı motorlu taşıtlarda uzun yıllardır generatör olarak kullanılmaktadır. Ayrıca aynı sebeplerle bu makine tipinin küçük güçlü rüzgar türbinlerine uygulamaları da literatürde mevcuttur.

Bu tezde, ilk olarak, Ansys Maxwell ortamında sabit mıknatıslı pençe kutuplu senkron generatörün 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, bu model kullanılarak generatörün doğrusal ve doğrusal olmayan yükler altında terminal gerilimlerinin harmonik bozulma seviyeleri ve efektif değerleri, terminal akımlarının harmonik bozulma seviyeleri, kayıpları ve moment dalgalanması karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Son olarak, modellenen generatörün doğrusal olmayan yüklenme altında terminal gerilimi harmonik bozulma ve efektif değer seviyelerini, kayıplarını ve moment dalgalanmasını iyileştirmek için çeşitli düşük geçiren LC pasif harmonik filtre tasarımları yapılmıştır. Generatörün filtrelili ve filtersiz durumlardaki performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Pençe kutuplu senkron generatör, LC pasif filtre, doğrusal olmayan yük, harmonik bozulma, sonlu elemanlar yöntemi.

Bilim Kod / Kodları : 90513, 90514, 90515

Sayfa Sayısı : 64

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF CLAW POLE SYNCHRONOUS GENERATOR UNDER NON-LINEAR LOADING CONDITIONS

MSC THESIS

YUSUF TOPRAK

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)

BALIKESİR, JULY - 2023

Claw pole synchronous machine has been used as a generator in internal combustion engine vehicles for a long time due to its some advantages as low cost, robust rotor structure and ease of fabrication. In addition, due to the same reasons, there are implementations of this machine type in small power wind turbines in the literature.

In this thesis, firstly, the 3D finite element model of the permanent magnet claw pole synchronous generator was provided in Ansys Maxwell environment. And then, by using this model, the terminal voltages harmonic distortion levels and effective values, terminal currents harmonic distortion levels, losses and torque ripple of the generator under linear and non-linear loads were comparatively analysed.

Finally, several low pass LC passive filters were designed to improve the terminal voltage harmonic distortion levels, terminal voltage effective values, losses and torque ripple of the modelled generator under non-linear loading. The performance of the generator with/without the filter were evaluated comparatively.

KEYWORDS: Claw pole synchronous generator, LC passive filter, nonlinear load, harmonic distortion, finite element method.

Science Code / Codes : 90513, 90514, 90515

Page Number : 64

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Tezin Sınırları.....	4
1.3 Tezin İçeriği.....	5
2. PENÇE KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLER	6
2.1 Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	6
2.2 Avantaj ve Dezavantajları	9
2.3 Çeşitleri.....	9
2.4 Terminal Gerilimi Harmonik Karakteristiği.....	11
2.5 Sonuç	14
3. KALICI MIKNATISLI PKSG’NİN ANSYS MAXWELL ORTAMINDA MODELLENMESİ.....	15
3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temelleri.....	15
3.2 RMXprt Ön Tasarımın Oluşturulması.....	16
3.3 Maxwell 3D’de PKSG’nin Modellenmesi	21
3.4 Maxwell Circuit Editör’de Eşdeğer Devrenin Oluşturulması	22
3.5 Sonuç	23
4. MODELLENEN PKSG’NİN BOŞTA VE YÜK ALTINDA PERFORMANS ANALİZİ.....	24
4.1 Boşta Çalışma Koşulları İçin Performans Analizi.....	26
4.2 Doğrusal (Saf Omik) Yük Altında Performans Analizi	27
4.3 Doğrusal Olmayan (6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucu) Yük Altında Performans Analizi	31
4.3.1 Doğrultucu Devresinin 1. Durumu için Analiz Sonuçları	33
4.3.2 Doğrultucu Devresinin 2. Durumu için Analiz Sonuçları	38
4.3.3 Doğrultucu Devresinin 3. Durumu için Analiz Sonuçları	42
4.4 Sonuç	45
5. PKSG’NİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜK ALTINDA PASİF FİLTRE KULLANILARAK PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ.....	47
5.1 Düşük Geçiren LC Pasif Filtre Tasarımı	47
5.2 Test Sistemi	49
5.3 Analiz Sonuçları	50
5.4 Sonuç	53
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	55
7. KAYNAKÇA.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Pençe kutuplu senkron generator görünümü [2].....	1
Şekil 2.1: PKSG'nin stator ve rotoru [23].....	6
Şekil 2.2: Geleneksel senkron generatörlerin rotor yapıları: (a) çıkık kutuplu ve (b) yuvarlak rotor [42].....	7
Şekil 2.3: PKSG'nin patlatılmış görünümü [43].....	7
Şekil 2.4: PKSG'de rotor manyetik alan çizgileri [1].....	8
Şekil 2.5: PKSG'nin otomotiv uygulamaları için tipik güç ve kontrol devresi [44].....	8
Şekil 2.6: (a) [47] ve (b) [9] çalışmalarında sunulan kalıcı mıknatıslı PKSG tasarımları. .	10
Şekil 2.7: (a) [4] ve (b) [23] çalışmalarında sunulan melez uyarımlı PKSG tasarımları... 10	10
Şekil 2.8: Klasik PKSG (CPA) ve melez uyarımlı PKSG (IPM-CPA)'ni aynı uyarım akımı için (a) boşa çalışma durumunda zıt EMK dalga şekilleri ile harmonik spektrumları ve (b) saf omik yük altında terminal gerilimi dalga şekilleri ile harmonik spektrumları [23].	13
Şekil 2.9: Klasik PKSG'nin aynı saf omik yüklenme durumunda (a) düşük ve (b) yüksek uyarım akımları için terminal gerilimi dalga şekilleri ve harmonik spektrumları [23].	13
Şekil 3.1: Stator nüve malzemesinin B-H karakteristiği.	18
Şekil 3.2: Stator nüve malzemesinin 50 Hz için B-P (çekirdek kaybı) karakteristiği.	18
Şekil 3.3: Stator sargı dağılımı.....	19
Şekil 3.4: Rotor nüve malzemesinin B-H karakteristiği.	20
Şekil 3.5: Rotor kutbunun kesiti ve parametre değerleri.....	20
Şekil 3.6: 3 boyutlu modelin farklı açılardan Maxwell ortamındaki görünümüleri.	21
Şekil 3.7: 3 boyutlu modelin parçalarının Maxwell ortamındaki görünümüleri.....	21
Şekil 3.8: Modellenen makinenin 3 boyutlu ağ örüntüsü.	22
Şekil 3.9: Modellenen kalıcı mıknatıslı PKSG'nin Maxwell Circuit Editör'de oluşturulmuş eşdeğer devresi.	23
Şekil 4.1: Boşa çalışma durumunda terminal hat gerilimlerinin harmonik spektrumları. .	27
Şekil 4.2: PKSG'nin doğrusal yük için oluşturulan analiz sistemi.	28
Şekil 4.3: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.	28
Şekil 4.4: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.	29
Şekil 4.5: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.	29
Şekil 4.6: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin kayıpları.	30
Şekil 4.7: Doğrusal yük için yüklenme oranıyla PKSG'nin MBD değerinin değişimi.	31
Şekil 4.8: 6 darbeli doğrultucunun 1. durumu için analiz sistemi.....	32
Şekil 4.9: 6 darbeli doğrultucunun 2. durumu için analiz sistemi.....	32
Şekil 4.10: 6 darbeli doğrultucunun 3. durumu için analiz sistemi.....	33
Şekil 4.11: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) için PKSG'nin %100 yüklenme oranında (a) terminal hat gerilimleri ve (b) terminal akımlarının harmonik spektrumları.	34
Şekil 4.12: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.	35
Şekil 4.13: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.	35

Şekil 4.14: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.	36
Şekil 4.15: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin kayıpları.	37
Şekil 4.16: 6 darbeli doğrultucu yükü (durum 1) için yüklenme oranıyla PKSG'nin MBD değerinin değişimi.	38
Şekil 4.17: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.	39
Şekil 4.18: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.	39
Şekil 4.19: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.	40
Şekil 4.20: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin kayıpları.	41
Şekil 4.21: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 2) için yumuşatma kapasitesi ile GBD oranının değişimi.	41
Şekil 4.22: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.	42
Şekil 4.23: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.	43
Şekil 4.24: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.	44
Şekil 4.25: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin kayıpları.	44
Şekil 5.1: Düşük geçiren LC pasif filtre tek faz devresi.	47
Şekil 5.2: (a) yıldız bağlı yıldız noktası topraklı olmayan kondansatör bankalı ve (b) üçgen bağlı kondansatör bankalı üç fazlı düşük geçiren LC filtreler.	48
Şekil 5.3: PKSG'nin anma gücünde 6 darbeli doğrultucu yük (durum 2) altında performansının iyileştirilmesi için tasarlanan pasif filtre devresini içeren sistem.	49
Şekil 5.4: 3 numaralı filtre tasarımı için (a) terminal hat gerilimlerinin ve (b) terminal akımlarının harmonik spektrumları.	52
Şekil 5.5: 50-1000 Hz frekans aralığı için tasarım 3 filtresinin tek faz eşdeğer devresinde yer alan bobin ve kondansatörün reaktanslarının değişimi.	53

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Stator boyutları ve oyuk boyutları.....	17
Tablo 3.2: Rotor nüvesinin boyutları.....	19
Tablo 5.1: PKSG'nin filtresiz ve filtreli durumları için performans parametre değerleri..	51

SEMBOL LİSTESİ

a.a.	: Alternatif Akım
B_{max}	: Manyetik Akı Yoğunluğunun Maksimum Değeri
C_d	: 6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucunun d.a. Tarafındaki Yumuşatma Kondansatörünün Kapasitesi
C_f	: 6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucunun Girişindeki Filtrenin Kapasitesi
d.a.	: Doğru Akım
f_r	: Filtrenin rezonans frekansı
L_f	: 6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucunun d.a. tarafındaki Tıkama (Süzme) Bobininin İndüktansı
P_C	: Çekirdek Kaybı
PKSG	: Pençe Kutuplu Senkron Generatör
PI	: Oransal Kontrol
P_T	: Toplam Kayıp
P_w	: Sargı Kaybı
R_d	: 6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucunun d.a. tarafındaki Yük Direnci
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
THDV	: Toplam Gerilim Harmonik Bozulması
THDI	: Toplam Akım Harmonik Bozulması
V_L	: Generatör Terminali Hat Gerilimi Gerçek Etkin Değeri (True RMS Value)
3B	: 3 Boyut

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında destekleri ve yol göstericiliğiyle her zaman yanımda olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Murat Erhan BALCI'ya, tezimi gerçekleştirmem sırasında yardımlarından dolayı Öğr. Dr. Şevket CANTÜRK'e ve Öğr. Gör. Dr. Oktay KARAKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte desteklerini esirgemeyen ailem ve değerli eşime ayrıca teşekkür ederim.

Balıkesir 2023

Yusuf TOPRAK

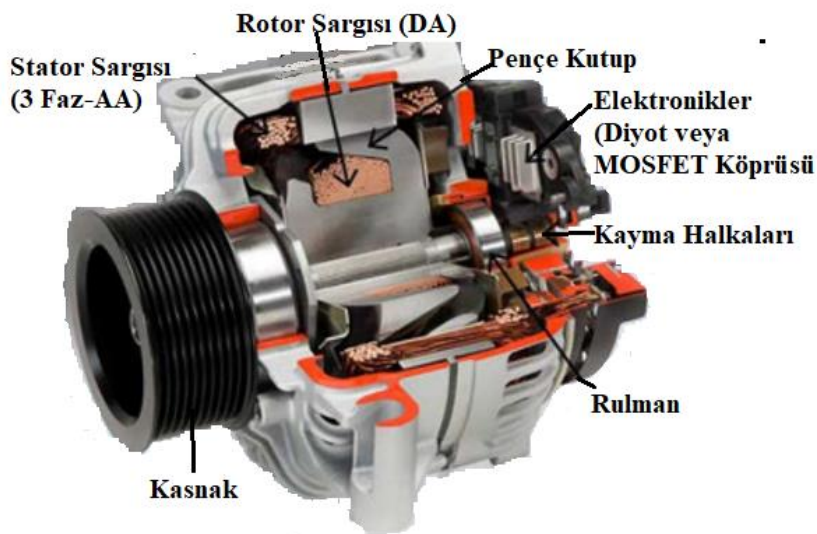
1. GİRİŞ

İlk araçların elektrik sistemlerinde 6 V'luk batarya ve doğru akım (d.a.) generatörler bulunmaktaydı. Ancak, d.a. generatörler düşük verim, düşük motor hızlarında düşük güç üretme ve fırça-kollektör yapısı sebebiyle bakım sorunu dezavantajlarına sahipti. Böylece, 1950'li yıllardan itibaren, kamu araçlarında d.a. generatörler yerine motorun boşa çalışma hızında daha yüksek güç üreten, daha yüksek verimli ve fırça-kollektör mekanizması olmayan alternatörlere (alternatif akım generatörlere) yönelim başlamıştır. Devamında, patenti 1965 yılında alınan pençe kutuplu senkron generatörler (PKSG'ler) kullanılmaya başlanmıştır [1].

Lundell tipi generatör olarak da bilinen pençe kutuplu senkron generatörler, araçlarda elektrik üretimi için günümüzde halen kullanılmaktadır [2-4]. Zaman içinde artan güç ihtiyacına bağlı olarak, anma gücü ve akımı değerleri 2 kW ve 140 A'ya ulaşmıştır [1].

Şekil 1.1'de kaynak [2]'den alınan 3 fazlı PKSG'nin görünümü sunulmuştur. PKSG'lerden araç içi yüklerin beslenmesi ve batarya şarjı için gerekli olan d.a. elde edilmesi, generatör terminaline bağlı kontrolsüz doğrultucularla gerçekleştirilmektedir [2, 3]. Farklı yüklenme seviyelerinde doğrultucu çıkış geriliminin genliğinin sabit tutulması ise gerilim regülatörleriyle generatör uyarım akımının ayarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir [3].

PKSG'ler, ayrıca küçük güçlü rüzgâr türbinleri için düşük maliyetli tasarımlarda generatör olarak da tercih edilmektedir [5, 6].



Şekil 1.1: Pençe kutuplu senkron generatör görünümü [2].

PKSG'nin geleneksel çıkık kutuplu ve yuvarlak rotorlu senkron makinelere benzemeyen kendine özgü merkezkaç kuvvetlerine dayanıklı ve sağlam bir rotor yapısı vardır. Bu yönüyle diğer iki geleneksel sargılı uyartımlı senkron makine tipinden ayrılır [1]. PKSG'nin, klasik (sargılı uyartımlı), kalıcı mıknatıslı ve melez uyartımlı tipleri mevcuttur [1, 4, 7].

Otomotiv endüstrisinde ve küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılan PKSG'ler üzerine literatür tarandığında, yapılan çalışmaların önemli bir kısmının bu makinaların çıkış momentinin, veriminin, moment dalgalanmasının ve akustik gürültüsünün en iyilenmesi amaç fonksiyonları için optimal tasarımın belirlenmesi olduğu görülmektedir [7-10]. Bu çalışmalarda, genel olarak pençe kutup geometrisi ve boyutları optimize edilecek parametreler olarak dikkate alınmış, kalıcı mıknatıslı/melez uyartımlı PKSG'ler için ise mıknatıs yeri, geometrisi ve boyutları da optimize edilmiştir. Optimal tasarım çalışmalarına paralel olarak, yapısı, uyartım şekli ve kullanılan rotor nüve malzemesi yönünden yeni PKSG tasarımlarının sunulduğu çalışmalar literatürde yer almaktadır [4, 11-14]. Dolayısıyla PKSG'lerin tasarımı üzerine literatürün gelişimini sürdürdüğü açıkça ifade edilebilir.

Bu çalışmalara ilaveten, PKSG'lerin performans analizi üzerine çalışmalarda literatürde mevcuttur [15-24]. Yapılan optimizasyon ve analiz çalışmaları, genellikle 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3B SEY) [19, 20] ve manyetik eşdeğer devre [7, 24] kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları ve ölçüm temelli [18] sonuçlarla gerçekleştirilmiştir.

Bahsedilen analiz çalışmalarında, makinenin özellikle gürültü ve titreşim performansının değerlendirilmesi ilgi görmüştür [15-18]. PKSG'nin tasarım parametrelerinin [15, 16], üretim süreçlerinin [17] ve çevresel çalışma koşullarının [18], elektromanyetik titreşim ve akustik gürültüsüne etkileri analiz edilmiştir.

Diğer taraftan, [19] ve [20] çalışmalarında ise PKSG'nin hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun dalga şeklinin önemli derecede bozuk olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca yine aynı iki çalışmada yapılan analizlerle, rotor boyutlarının ve makine uzunluğunun hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun bozulmasına etki ettiği gösterilmiştir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun dalga şeklinin bozuk olmasına bağlı olarak boşa çalışma ve doğrusal yük altında işletme durumları için PKSG'nin faz gerilimlerinin dalga şekillerinin de bozuk olduğu diğer analiz çalışmalarından [21-24] ifade edilebilir.

Güç sistemlerinde meydana gelen gerilim ve akım harmonik bozulmasının,

- Kondansatörler, enerji nakil hatları ve elektrik makinalarında ekstra kayıplara [25-30],
- Düşük güç faktörüne [31-33],
- Dönen elektrik makinalarında moment dalgalanmaları ve titreşimlere [25, 27],
- Sistem elemanlarında kayıp artışlarına bağlı aşırı ısınma ve ömür kaybına [25, 27],
- Elektronik devrelerin hatalı çalışmasına [26],
- Güç elektroniği devrelerinin akım harmonik bozulmasında kötüleşmeye ve doğrultucu devrelerinin çıkış gerilimlerinde dalgalanma artışına [31, 33, 34],

sebepler olduğu literatürde iyi bilinmektedir.

Yukarıda sıralanan olumsuz etkileri önlemek amacıyla, harmonikleri kompanze eden pasif ve aktif filtreler kullanılmaktadır [35, 36]. Pasif filtreler direnç, kondansatör ve bobin pasif elemanlarından oluşurken, aktif filtreler yarı iletken anahtarlardan oluşan güç elektroniği devreleridir. Her iki filtrenin kaynak ile yük arasına seri yerleştirilen ve besleme noktasına (yüke) paralel yerleştirilen sırasıyla seri ve paralel tipleri vardır.

Paralel pasif filtreler ayarlandıkları rezonans frekansında düşük empedans gösterir ve rezonans frekansı civarındaki harmonik akımlarının üzerlerinden toprağa akmasını sağlarlar. Seri pasif filtreler ise ayarlandıkları rezonans frekansında yüksek empedans gösterir ve rezonans frekansı civarındaki harmonik akımlarının kaynak ile yük arasında akışına engel olur. Bununla birlikte, paralel pasif filtreler kendi içinde farklı empedans-frekans davranışına sahip tek ayarlı, çift ayarlı, üç ayarlı, bastırılmış tek ayarlı, bastırılmış çift ayarlı, C-tipi ve yüksek geçiren tiplere sahiptir [37].

Aktif filtrelerin paralel tipleri akım harmonik kaynağı, seri tipleri ise gerilim harmonik kaynağı şeklinde kontrol edilir. Aktif filtreler, paralel pasif filtrelere kıyasla daha yüksek harmonik filtreleme performansına sahiptir. Ancak maliyetleri daha yüksektir [38]. Bu durum, her iki filtrenin birbirine göre avantajlarının bir araya getirildiği melez filtre uygulamalarını ortaya çıkarmıştır [36].

Filtrelere ilaveten harmoniklerin olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik bir önlem olarak, transformatörler, asenkron motorlar ve kabloların harmonikli gerilim/akım şartlarında anma kayıplarını aşarak aşırı ısınıp ömür kaybına uğramasını engellemek amacıyla harmonikli şartlarda yeniden boyutlandırması da literatürde karşımıza çıkmaktadır [30, 37-40].

Buraya kadar sunulan ulaşılabilen literatürde,

- PKSG'nin doğrusal olmayan yüklenme altında, terminal gerilim harmonik bozulması üzerine az sayıda performans analizi çalışmasına rastlandığı,
- Bu performans analizi çalışmalarında doğrusal ve doğrusal olmayan yüklenmenin karşılaştırmalı olarak ele alınmadığı,
- Otomotiv uygulamalarındaki geleneksel yük olan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucunun devre parametrelerinin değişiminin PKSG'nin performansı üzerine etkilerini analiz eden çalışmaya rastlanmadığı,
- Doğrusal olmayan yüklenme altında (6 darbeli kontrolsüz doğrultucu devresi) PKSG'nin terminal gerilimi harmonik bozulmasını ve etkin değerini, terminal akımı harmonik bozulmasını, kayıplarını ve moment dalgalanmasını iyileştirmek için pasif harmonik filtre tasarımına yönelik çalışmalara rastlanmadığı,

ifade edilebilir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, içten yanmalı motorlu kara taşıtlarında yaygın olarak kullanılan ve küçük güçlü doğrudan sürüşlü rüzgâr türbinlerinde de tercih edilen pençe kutuplu senkron generatörlerin doğrusal olmayan yüklenme altında,

- Modellenmesi,
- Performans analizi,
- Ve performansının pasif filtre kullanarak iyileştirilmesi,

amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, analizlerde kalıcı mıknatıslı PKSG'nin terminal gerilimi harmonik bozulması ve etkin değeri, terminal akımı harmonik bozulması, kayıpları ve moment dalgalanması performans indisleri olarak ele alınmıştır. 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu devreli yükün parametrelerinin (d.a. tarafındaki omik direnç ve yumuşatma kapasitesi ile a.a. tarafındaki tıkama indüktansının), performans indislerine etkisi benzetim yoluyla analiz edilmiştir. Ayrıca, analizlerde gerilim etkin değer, harmonik bozulma ve kayıp değerleri, doğrusal saf omik yük altında çeşitli yüklenme oranları için de incelenmiştir. Böylece doğrusal olmayan yüklenmenin kalıcı mıknatıslı PKSG'nin performansına etkisi karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

1.2 Tezin Sınırları

Bu tezin sınırları,

- Analiz sonuçlarının Ansys Maxwell ortamında 3 boyutlu SEY ile elde edilmesi,
- 6 darbeli doğrultucu devresindeki diyotların ideal olması,
- 6 darbeli doğrultucu devresindeki bobin ve kondansatörün iç dirençlerinin ihmal edilmesi,
- Kullanılan pasif filtrede yer alan bobin ve kondansatörün iç dirençlerin ihmal edilmesi,
- Generatör toplam kaybı hesap edilirken çekirdek ve sargı kayıplarının dikkate alınması, sürtünme ve vantilasyon kayıplarının ihmal edilmesi,

olarak belirtilebilir.

1.3 Tezin İçeriği

Giriş bölümünün devamındaki ikinci bölümde, ülkemizde ve Dünya’da Elektrik Mühendisliği eğitiminde verilen elektrik makinaları derslerinde yer almayan ve özel bir elektrik makinası olan pençe kutuplu senkron makinenin yapısı, avantaj-dezavantajları ve çalışma prensibi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında benzetim temelli analizlerde dikkate alınan kalıcı mıknatıslı PKSG’nin Ansys Maxwell yazılım ortamında oluşturulan 3B SEY modeli detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, boşta çalışma ile doğrusal (saf omik) ve doğrusal olmayan (6 darbeli kontrolsüz doğrultucu) yükler için kalıcı mıknatıslı PKSG’nin hat gerilimi etkin değerleri ve toplam harmonik bozulma değerleri (THDV’leri), hat akımı toplam harmonik bozulma değerleri (THDI’ları), kayıpları ve moment dalgalanmaları parametrik olarak analiz edilmiştir.

Beşinci bölümde, 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu yükü besleyen PKSG’nin terminal gerilimi etkin değeri, THDV, THDI, kayıpları ve moment dalgalanmasının iyileştirilmesi için çeşitli düşük geçiren LC pasif harmonik filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan filtrelerin PKSG’nin performans parametreleri üzerindeki iyileştirme etkileri değerlendirilmiştir.

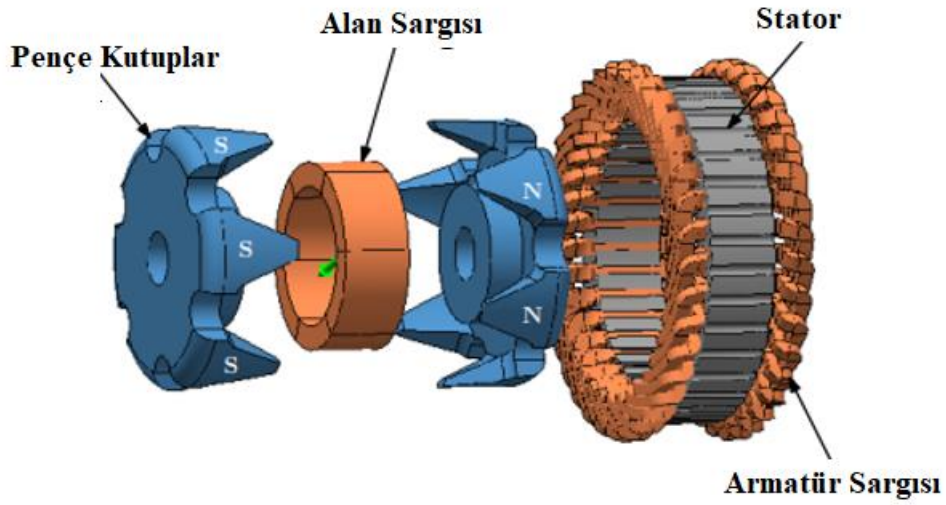
Son bölümde ise önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar özet halinde sunulmuş ve tartışılmış, tezin devamı niteliğindeki gelecek çalışmalar hakkında öneriler verilmiştir.

2. PENÇE KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLER

Bu bölümde, PKSG'lerin sırasıyla yapısı, çalışma prensibi, avantaj – dezavantajları, çeşitleri ve terminal gerilimi harmonik karakteristiği üzerine bilgi sunulmuştur.

2.1 Yapısı ve Çalışma Prensibi

Şekil 2.1'deki kaynak [23]'den alınan resimden, PKSG'nin rotorunun, iki adet pençe şeklinde parça ve bunların içinde düz bir şekilde sarılı uyartım sargılarından oluştuğu görülmektedir.

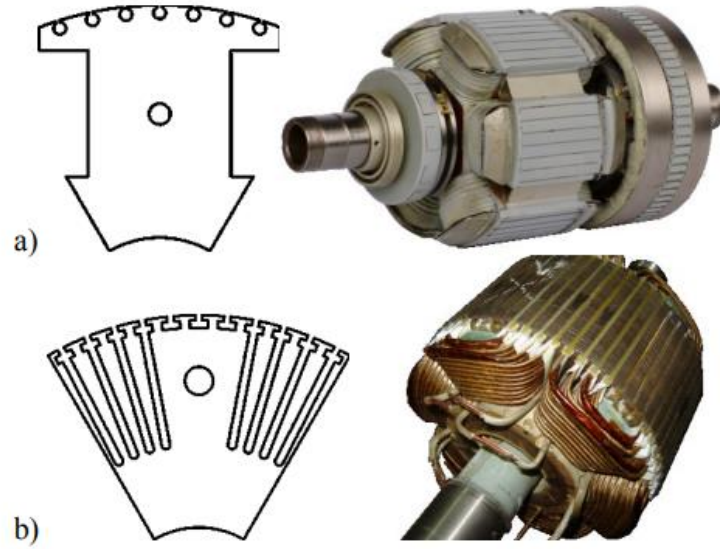


Şekil 2.1: PKSG'nin stator ve rotoru [23].

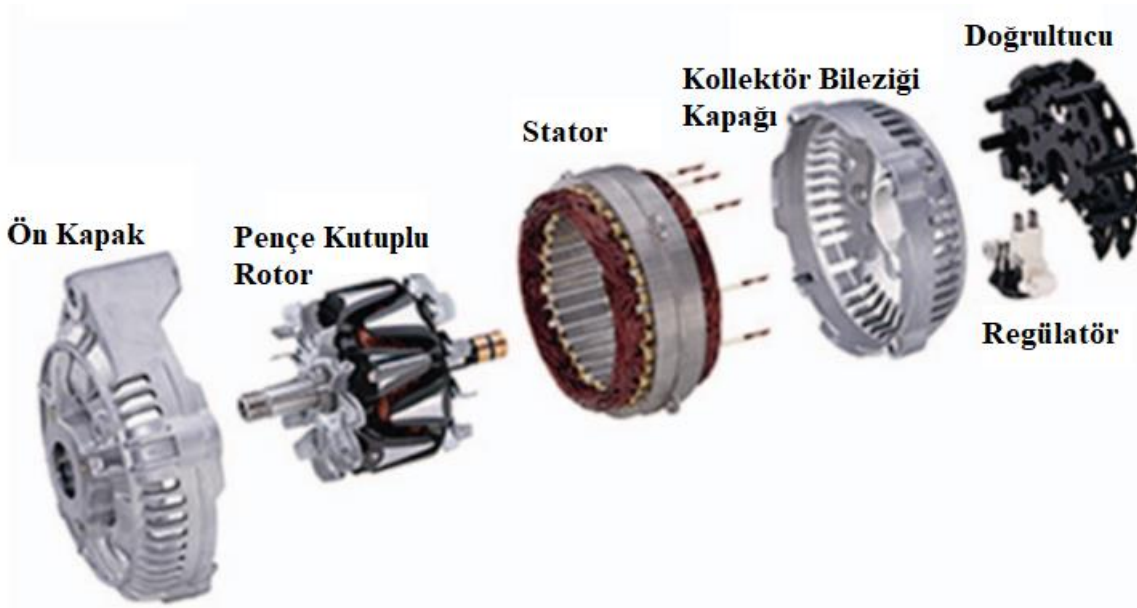
Uyartım sargılarına doğru akım verilerek makinenin uyartımı sağlanır. PKSG'de stator, geleneksel elektrik makinalarında olduğu üzere iki tarafı yalıtılmış manyetik saç malzemelerin paketlenmesiyle üretilir ve üzerinde sargıların yerleştirildiği oyuklar bulunur. Dolayısıyla, bu makinenin Çıkık kutuplu ve yuvarlak rotorlu senkron makinelerden temel farkının rotorları olduğunun altı çizilmelidir [41]. Her iki geleneksel senkron generatörün rotor yapıları kaynak [42]'den alınan Şekil 2.2'den görülmektedir.

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'den PKSG'nin yapısında bulunan diğer kısımların, ön ve arka kapak, fırçalar ve bilezikler, dahili doğrultucu ve çıkış geriliminin seviyesini kontrol eden gerilim regülatörü olduğu görülmektedir [1, 43]. Buradan, PKSG'nin klasik senkron generatörlerden bir diğer farklı niteliğinin, klasik senkron generatörlerin terminalinde a.a. gerilim olduğu, PKSG'lerin çıkışında ise dahili doğrultucuyla elde edilen d.a. gerilimin olduğu ifade edilebilir. Ayrıca, Şekil 2.4'den fırçalar ve bilezikler üzerinden rotor sargılarına verilen d.a.

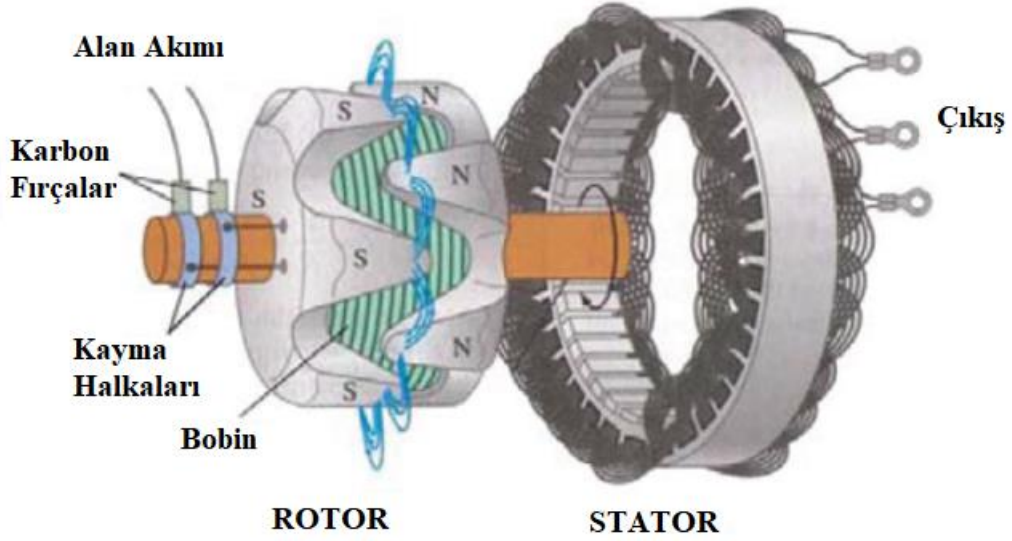
neticesinde oluşan manyetik akının pençelerin birinin üzerinden çıktığı sonrasında hava aralığı ve stator sargılarını dolaşp ardışıl pençe üzerinden tekrar rotora girdiği görülmektedir [1, 42]. Böylece rotor kutupları basit bir yapıyla oluşturulmakta ve rotorun döndüğü durumda elde edilen dönen alan sayesinde stator sargılarında alternatif gerilim indüklenmektedir.



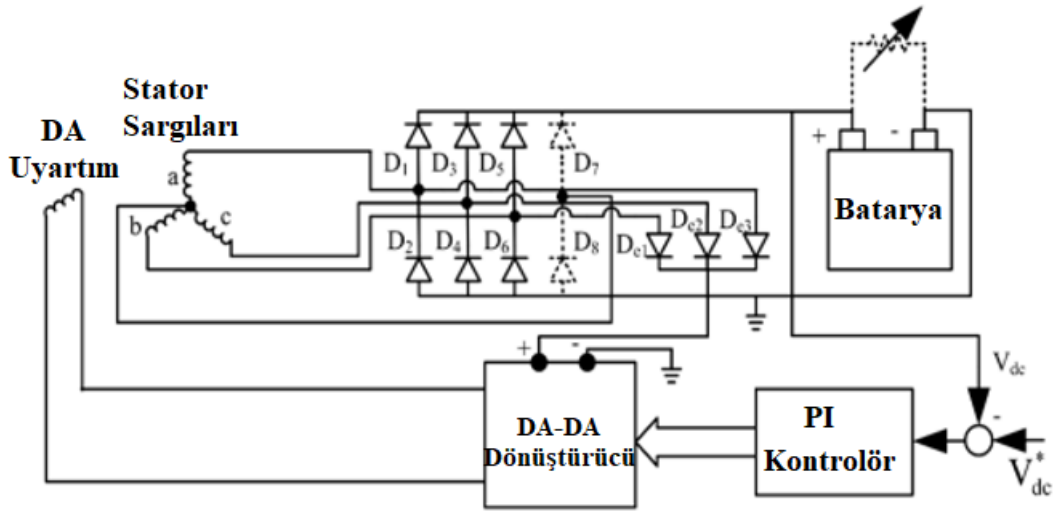
Şekil 2.2: Geleneksel senkron generatörlerin rotor yapıları: (a) çıkık kutuplu ve (b) yuvarlak rotor [42].



Şekil 2.3: PKSG'nin patlatılmış görünümü [43].



Şekil 2.4: PKSG’de rotor manyetik alan çizgileri [1].



Şekil 2.5: PKSG’nin otomotiv uygulamaları için tipik güç ve kontrol devresi [44].

Kaynak [44]’den alınan PKSG’lerin otomotiv uygulamaları için tipik kontrol ve güç devresi şematığı Şekil 2.5’de verilmiştir. Bu şekle göre, üç fazlı PKSG stator sargı uçlarındaki alternatif gerilim 6 darbeleri kontrolsüz doğrultucu ile doğrultularak otomobilde bulunan batarya ve yükler beslenmektedir. Yine stator sargıları uçlarındaki a.a. gerilim üç fazlı yarım dalga doğrultucu ile d.a.’ya çevrildikten sonra bir d.a.-d.a. dönüştürücü üzerinden genliği ayarlanarak generatör uyarım sargılarına verilmektedir. d.a.-d.a. dönüştürücü çıkışındaki uyarım akımının genliği, bir PI kontrolör vasıtasıyla d.a. besleme geriliminin değeri

istenilen seviyede olacak şekilde ayarlanmaktadır. Diğer bir deyişle, d.a.-d.a. dönüştürücü ve kontrolörü gerilim regülatörü olarak görev yapmaktadır [44].

Burada, PKSG'lerde akustik gürültüyü azaltmak amacıyla 6 fazlı ve 12 darbeli doğrultuculu tasarımların literatürde çalışıldığı ifade edilmelidir. Ancak makinenin yaygın kullanımı 3 fazlı ve 6 darbeli doğrultuculu yapısına sahiptir [45].

2.2 Avantaj ve Dezavantajları

PKSG'lerin avantajları olarak sırasıyla;

- Pençe şeklindeki iki rotor parçasının birbirine geçmesiyle küçük hacimde çok sayıda kutup oluşturulabilmesi ve böylece yüksek moment yoğunluğuna ulaşılabilmesi [4, 23],
- Geniş hız aralığı ve sağlam rotor tasarımı [43],
- Düşük maliyet ve basit üretim [24],

olarak sayılabilir.

Diğer taraftan bu makinelerin dezavantajları ise;

- Hava aralığı manyetik akısının yüksek harmonik bozulmasından kaynaklı rotordaki yüksek demir kayıpları [23],
- Komşu pençeler arasındaki yüksek kaçak akılar [23, 24],
- Bilezikler ve fırçaların güvenilirliği düşürmesi [43],
- Bilezikler ve fırçalardan kaynaklı ekstra kayıplar [46],
- Ve düşük verim [1, 43],

olarak ifade edilebilir.

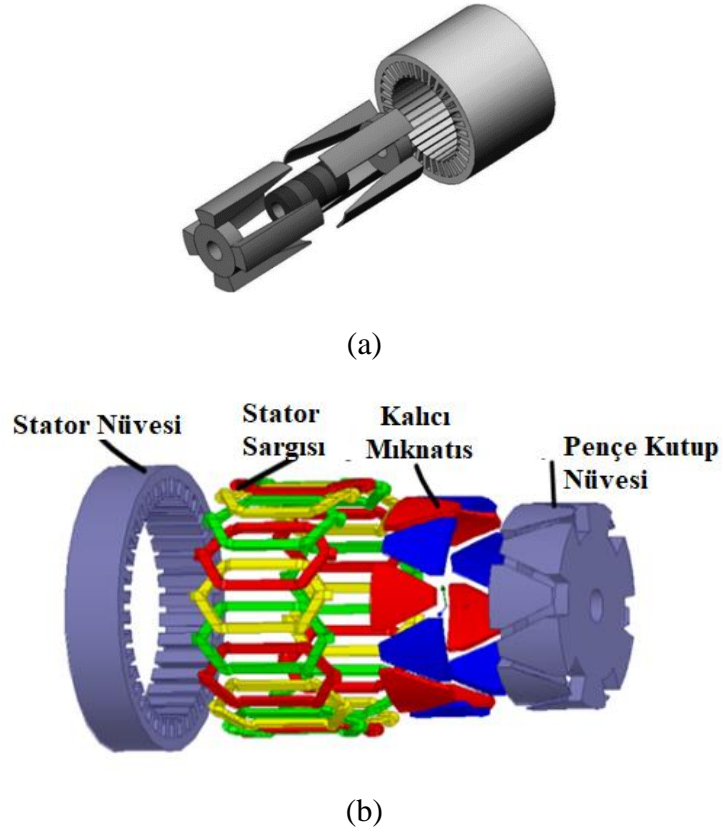
Bütün bu dezavantajlarına karşın avantajlarının daha ağır basması sebebiyle günümüzde hala bu klasik PKSG'lerin yaygın olarak kullanıldığını tekrar hatırlatmak gerekir.

2.3 Çeşitleri

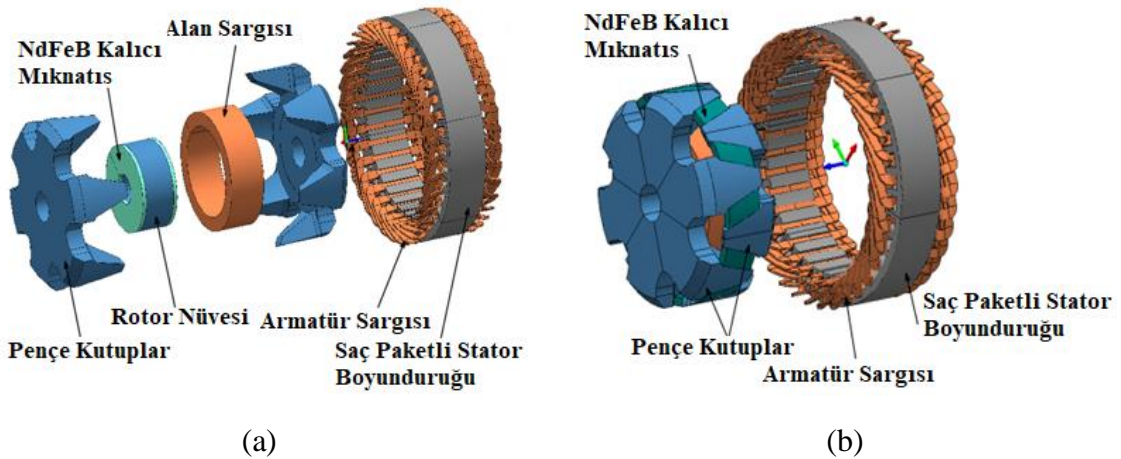
Yukarıda sıralanan dezavantajlardan bilezikler ve fırçalarla ilgili olanları elemine etmek ve verimi yükseltmek amacıyla literatürde kalıcı mıknatıslı PKSG tasarımları önerilmiştir [47].

Bu makinalara örnek olarak [9] ve [47] çalışmalarından alınan makina geometrileri Şekil 2.6'da verilmiştir. Ancak, rotoruna kalıcı mıknatıslar yerleştirilen ve uyarım sargısı bulunmayan kalıcı mıknatıslı PKSG'ler ise uyarımın ayarlanması yoluyla gerilimin basitçe kontrolü yeteneğine sahip değildirler [11, 48].

Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için hem sargılı hem de kalıcı mıknatıslı uyarım devresine sahip melez uyarımlı PKSG'ler literatürde çalışılmıştır [43, 48]. Bu makinalara örnek olarak, [4] ve [23] çalışmalarından alınan makina geometrileri Şekil 2.7'de verilmiştir. Ayrıca, [49]'da sargılı uyarımlı klasik bir PKSG'de rotora mıknatıslar yerleştirilerek çıkış gücünde %22'den fazla artışa ulaşıldığı raporlanmıştır.



Şekil 2.6: (a) [47] ve (b) [9] çalışmalarında sunulan kalıcı mıknatıslı PKSG tasarımları.



Şekil 2.7: (a) [4] ve (b) [23] çalışmalarında sunulan melez uyarımlı PKSG tasarımları.

2.4 Terminal Gerilimi Harmonik Karakteristiği

Alternatif akım elektrik güç sistemlerinin, geleneksel olarak, belirli anma frekans ve anma etkin değerlerinde ve sinüzoidal dalga formunda olan gerilimler ve akımlar altında işletilmek üzere tasarlandıkları literatürde iyi bilinen bir durumdur. Ancak, deşarj lambaları ve güç elektroniği temelli devreler vb. doğrusal olmayan yükler bozulmuş dalga formuna sahip akımlar çekerler [27, 50]. Ayrıca, elektrik makineleri de nüvelerindeki manyetik malzemenin doyma durumu sebebiyle güç sistemlerinde sinüzoidal olmayan gerilimler ve akımlara sebep olabilirler [26].

Bu sinüzoidal olmayan gerilim ve akım kaynaklarının bulunduğu güç sistemlerinde, bilinmeyen gerilimler ve akımlar sistemin zaman tanım bölgesinde diferansiyel durum denklemlerinin çözümüyle bulunabilir. Ancak, zaman tanım bölgesi analizler özellikle büyük sistemler için aşırı işlem yükü ve uzun çözümleme süreleri gerektirirler [51, 52]. Dolayısıyla, literatürdeki çalışmalarda ve pratik uygulamalarda daha çok frekans tanım bölgesinde çözüm tercih edilir [52].

Frekans tanım bölgesi analiz için sinüzoidal olmayan gerilimler ve akımlar Fourier serilerine açılır. Fourier serisinde bulunan temel frekansın (şebeke çalışma frekansının) tam sayı katı frekanslardaki bileşenler literatürde “harmonik” olarak isimlendirilmiştir [27]. Örneğin, 50 Hz çalışma frekansına sahip bir şebekede gerilim veya akım dalgasında bulunan 250 Hz’lik bir bileşen 5. harmonik, 350 Hz’lik bir bileşen 7. harmonik olarak ifade edilir. Ayrıca, şebeke frekansının altındaki frekanslardaki bileşenlere “alt harmonik” [29], şebeke frekansının tam sayı katı olmayan frekanslardaki bileşenlere “ara harmonik” [53] ve 2 kHz üzerindeki frekanslardaki bileşenlere ise “supra harmonik” [53] isimleri literatürde verilmiştir. Dönen elektrik makinalarında temel frekansla aynı yönde dönen manyetik alan oluşturan harmoniklere pozitif sıra harmonikleri, ters yönde dönen manyetik alan oluşturan harmoniklere negatif sıra harmonikleri ve dönen manyetik alana herhangi bir etkisi olmayan harmoniklere ise sıfır sıra harmonikleri denmektedir [27]. Dengeli şartlarda, 4, 7, 8, 10,... harmonik numaraları pozitif sıra, 2, 5, 8, 11....harmonik numaraları negatif sıra harmonikleri ve 3, 6, 9, 12...harmonik numaraları sıfır sıra harmonikleridir. Buna ilaveten, dengeli şartlarda ve topraksız sistemlerde sıfır sıra akım harmonikleri dolaşmazlar.

Harmonik bozulmanın, elektrik makinaları üzerine çeşitli olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuz etkilerin en önemlilerinden biri, hem sargı hem de nüve kayıplarının frekans bağımlı olmaları sebebiyle harmonikli şartlarda elektrik makinalarında ekstra kayıplar

meydana gelmesidir [25, 27, 54]. Harmoniklere bağı ektra kayıplar ise anma yüklenme durumunda aşırı ısınma ve ömür kaybına sebep olur [25, 26]. Diğer taraftan, alt harmoniklerin nüvede doymaya sebep olması diğer bir olumsuz etkidir [29]. Ayrıca, harmonikler dönen elektrik makinalarında moment darbeleri (dalgalanmaları) meydana getirirler [26].

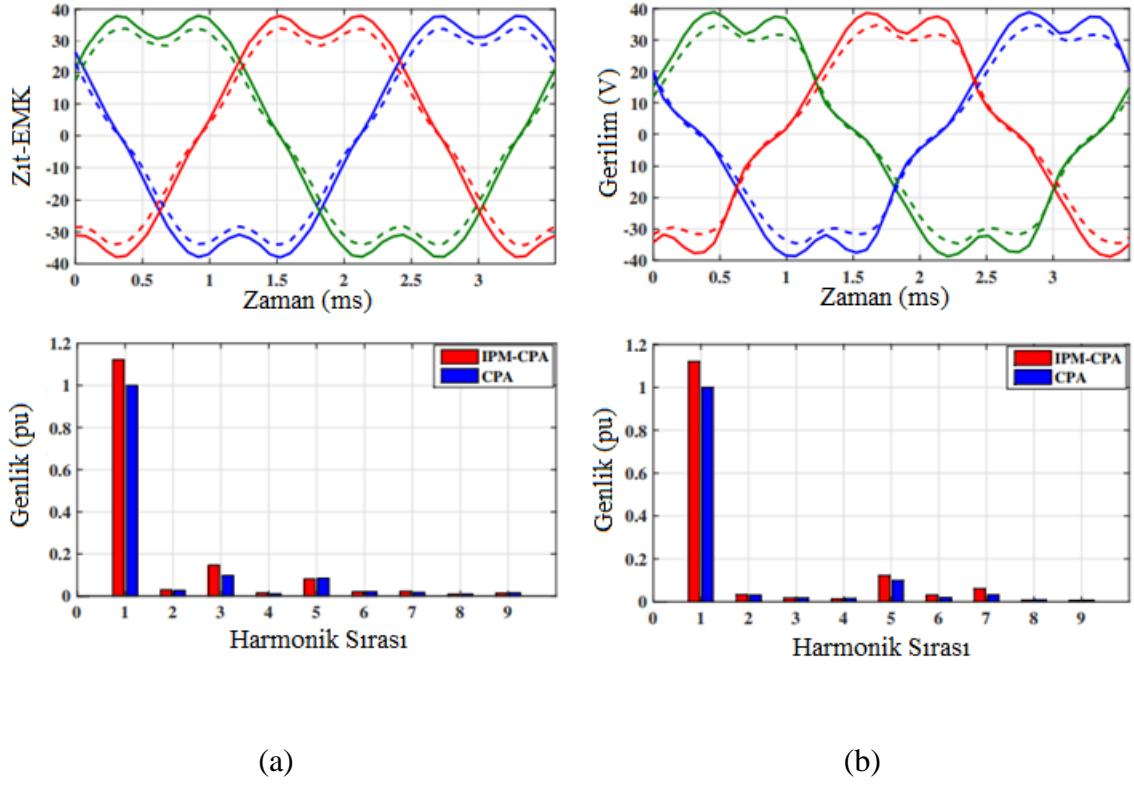
Buraya kadar belirtilenler doğrultusunda özetlemek gerekirse, elektrik makineleri hem yapılarından kaynaklı hem de besledikleri doğrusal olmayan yüklerin ürettikleri harmonik akımlarına bağı olarak bozulmuş gerilimler ve akımlara sahip olabilirler. Bu harmonik bozulmalar performanslarına ve ömürlerine olumsuz etki eder.

Bu kısımda, tez konusu makine olan PKSG'nin terminal gerilimi harmonik bozulmasının karakteristiğı hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, konu üzerine literatürde ulaşılabilen az sayıda çalışmadan biri olan [23]'deki klasik PKSG (Şekil 2.1'de gösterilen makine) ve melez uyarımlı PKSG (Şekil 2.7 (b)'de gösterilen makine) arasında yapılan karşılaştırmalı analiz sonuçları yine aynı yayından alınan Şekil 2.8'den görölmektedir. Bu şekilde, her iki tip generatöre ait boşa çalışma durumunda indüklenen zıt EMK (elektromotor kuvvet) ve saf omik yük altındaki terminal faz gerilimlerinin dalga formları ve harmonik spektrumları yer almaktadır.

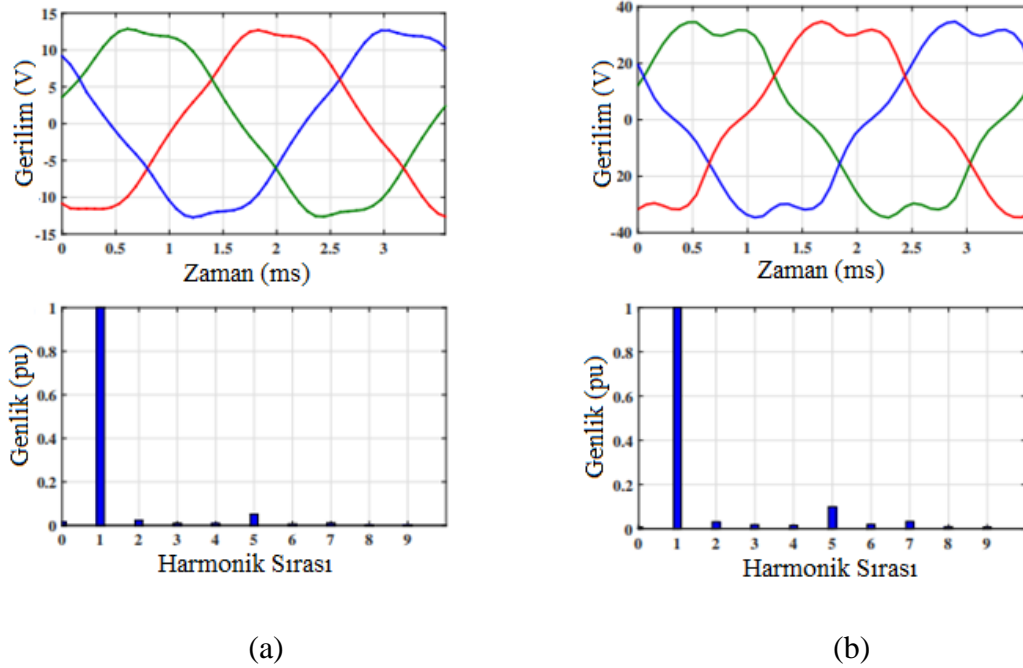
Şekil 2.8 (a) boşa çalışma durumunda hem klasik hem de melez PKSG'de indüklenen zıt EMK diğer bir deyişle boşa çalışma terminal gerilimi dalga şekillerinin kayda değer derecede bozulmuş olduğunu, ayrıca 3. ve 5. harmonik büyüklüklerinin diğer temel olmayan harmoniklere göre baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 2.8 (b)'den ise saf omik yüklenme durumunda her iki generatör için terminal gerilimi dalga formunun baskın harmoniklerinin 5. ve 7. harmonikler olduğu görölmektedir.

Bunlara ilaveten, incelenen şekillerden, boşa ve yükte çalışma durumlarında melez PKSG'nin klasik tipe göre terminal geriliminin daha yüksek temel bileşen ve temel olmayan harmoniklere sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 2.9'da ise yine kaynak [23]'den alınan saf omik yük altında klasik PKSG'nin düşük ve yüksek uyarım durumlarındaki terminal faz gerilimlerinin dalga şekilleri ve harmonik spektrumları verilmiştir. Bu şekilden de uyarım artışıyla 5. ve 7. harmonik bileşenlerinin genliklerinin dikkate değer derecede büyüdüğü ifade edilebilir.



Şekil 2.8: Klasik PKSG (CPA) ve melez uyarımlı PKSG (IPM-CPA)’ni aynı uyarım akımı için (a) boşa çalışma durumunda zıt EMK dalga şekilleri ile harmonik spektrumları ve (b) saf omik yük altında terminal gerilimi dalga şekilleri ile harmonik spektrumları [23].



Şekil 2.9: Klasik PKSG’nin aynı saf omik yüklenme durumunda (a) düşük ve (b) yüksek uyarım akımları için terminal gerilimi dalga şekilleri ve harmonik spektrumları [23].

2.5 Sonuç

Bu b6l6mde, 6lkemizde ve D6nya’da Elektrik M6hendisliği eğitiminde elektrik makinaları derslerinde yer almayan ve 6zel bir elektrik makinası olan PKSG’nin yapısı, avantaj-dezavantajları ve çalışma prensibi hakkında literat6rdeki yakın tarihli çalışmalardan alıntılar yapılarak bilgi verilmiştir.

Ayrıca, PKSG’nin klasik (sargılı uyartımlı) ve melez uyartımlı (sargılar ve mıknatısla uyartımlı) tiplerine ait terminal faz gerilimlerinin boşta çalışma ve saf omik y6klenme durumlarında dalga şekilleri ve harmonik bileşenleri literat6rdeki çalışmalardan alıntılanan analiz sonuçları ışığında yorumlanmıştır.

3. KALICI MIKNATISLI PKSG'NİN ANSYS MAXWELL ORTAMINDA MODELLENMESİ

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen benzetim temelli analizlerde dikkate alınan 1.5 kVA, 150 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG'nin 3B SEY modelinin Ansys Maxwell yazılım ortamında [55, 56] oluşturulma aşamaları sırasıyla sunulmuştur. Burada, şu belirtilmelidir ki; dikkate alınan model Ansys Maxwell'in kütüphanesinde yer alan 0.55 kVA, 115 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG boyutları revize edilerek türetilmiştir.

3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temelleri

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) literatürdeki elektrik makinaları üzerine tasarım ve analiz çalışmalarında yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir [57]. Yöntemin uygulaması kısaca,

- Geometrinin oluşturulması ve malzeme özelliklerinin tanımlanması,
- Sınır koşulların (fiziksel sınırlamaların) belirlenmesi,
- Ağ (Mesh) üretimi veya sonlu elemanların belirlenmesi,
- Her ağ elemanı için Maxwell denklemlerinin yazılması ve çözüm bölgesindeki tüm elemanlar dikkate alınarak elde edilen denklem takımının çözülmesi,

adımlarıyla izah edilebilir [58].

Analiz edilecek geometrinin oluşturulması ve malzeme özelliklerinin tanımlanması adımı, dönen bir elektrik makinesi için rotor, stator, sargılar ve mıknatıs gibi kısımların boyutları ve şekillerinin tanımlanmasının yanı sıra, sargılar, çekirdek malzemesi ve mıknatısların malzeme özelliklerini tanımlamayı da içerir.

Sınır koşulların belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar olmakla birlikte, sınır üzerindeki potansiyel değerinin belirli olması (Dirichlet türü) yaklaşımı yaygın olarak tercih edilmektedir [59].

Ağ oluşturma adımında, daha önce tanımlanan geometri, sonlu elemanlar olarak adlandırılan küçük ve birbirine bağlı alt bölgelere ayrılır. Böylece, makinenin geometrisi sonlu sayıda küçük bölgeden oluşan bir ağ halini alır [58, 59]. Günümüzde Ansys Maxwell gibi ticari yazılımlar hata ve analiz süresini dikkate alarak ağ sayısını optimum olarak belirleyebilmektedir.

SEY analizinin son adımında çözülen Maxwell denklemleri ise aşağıda sunulmuştur [59]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_V \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde, ρ_V ve J sırasıyla C/m^3 biriminde hacimsel yük yoğunluğu ve A/m^2 biriminde akım yoğunluğunu, B manyetik alan, E elektrik alan, D deplasman vektörü ve H manyetik alan şiddetidir.

3.2 RMxpirt Ön Tasarımın Oluşturulması

RMxpirt, dönen elektrik makinelerini analitik ifadeler temelli tasarlamak ve analiz etmek için kullanılan ANSYS firmasına ait Ansoft Electronic Desktop yazılımının bir modülüdür [56]. RMxpirt modülüyle, dönen elektrik makinalarının Maxwell 2D ve Maxwell 3D modüllerinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temelli detaylı analizinden evvel ön tasarımları yapılabilir. RMxpirt ile ön tasarımı yapılan makinenin 2 boyutlu (2B) veya 3 boyutlu (3B) modeli Maxwell 2D veya 3D'ye pratik bir şekilde aktarılabilir.

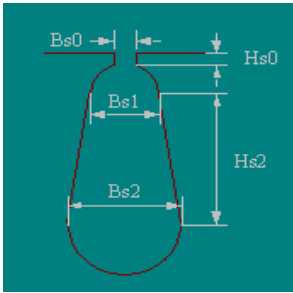
RMxpirt'den 2B modele aktarım yapılabilmesi için makine laminasyonunun makine eksenine boyunca aynı olması gerekmektedir. Aksi takdirde sadece 3B modelleme yapılabilir. Bu tez çalışmasında modellenen PKSG'nin rotor yapısı buna uymadığı için bu makine tipinin SEY analizi sadece 3B modellemeyle mümkün olmaktadır. 3B SEY modellemenin analiz süresi ve hesaplama yükü 2B modellemeye göre daha fazla olacaktır. Dolayısıyla PKSG'nin Maxwell 3D'de nihai tasarımının elde edilmesi pratik değildir.

Bu sebeple, Ansys Maxwell yazılımının kütüphanesinde bulunan 0.55 kVA, 115 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG'nin boyutları revize edilerek, tez kapsamında dikkate alınan 1.5 kVA, 150 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG'nin ön tasarımı RMxpirt'de yapılan analizlerle elde edilmiştir.

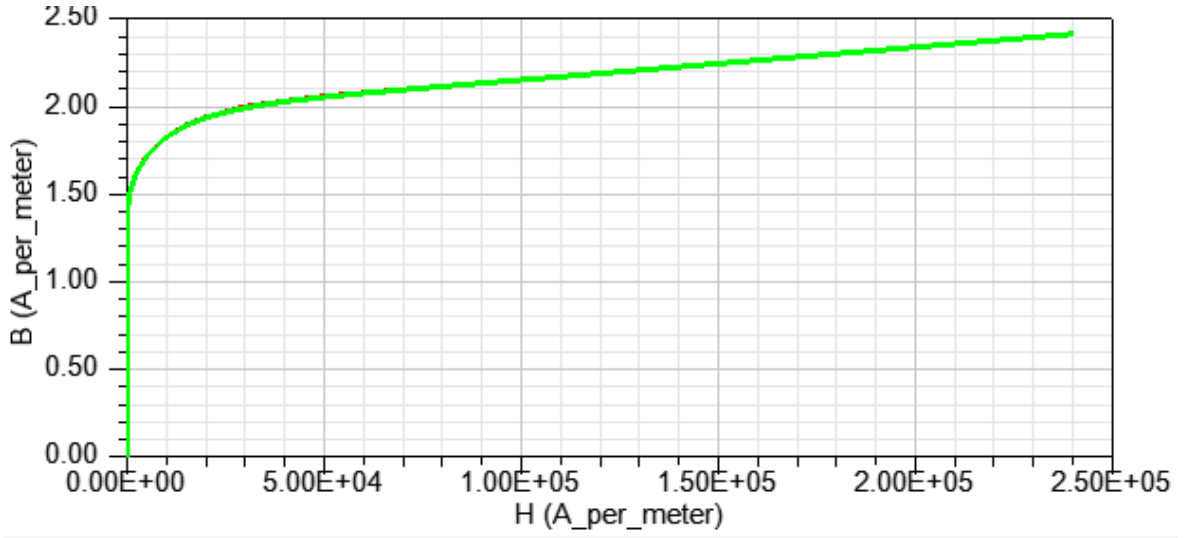
Tez kapsamında çalışılan üç fazlı PKSG kalıcı mıknatıslı uyarımlı olduğu için rotorunda sargılar yerine mıknatıslar vardır. Çalışılan PKSG’de, üç fazlı sargıların yerleştirildiği oyuklar stator nüvesi üzerinde homojen bir şekilde yerleştirilmiştir. Tasarıma ait stator boyutları ve oyuk boyutları Tablo 3.1’de verilmiştir. Statorda nüve malzemesi olarak yazılımın kütüphanesinde bulunan “JFE_Steel_35JN360” tipi malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeye ait B-H ve 50 Hz için B-P (çekirdek kaybı) karakteristik eğrileri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.1’den görüldüğü üzere kullanılan malzemenin B-H eğrisinin dirsek noktası yaklaşık olarak 1.7 Tesla’dır. Şekil 3.2’de çekirdek kaybı 1 Tesla’da 1.289 W/kg, 1.5 Tesla’da 2.94 W/kg ve dirsek noktası olan 1.7 Tesla’da 3.93 W/kg’dır. Stator 24 oyuktan oluşmakta ve 3 fazlı sargılar dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. Sargı katman sayısı 2, bobin adımı 5, kullanılacak iletkenin çapı 0.9116 mm (AWG19), bir oyuktaki iletken sayısı 48x5’dir. Seçilen parametrelere göre sargı dağılımı Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Stator boyutları ve oyuk boyutları.

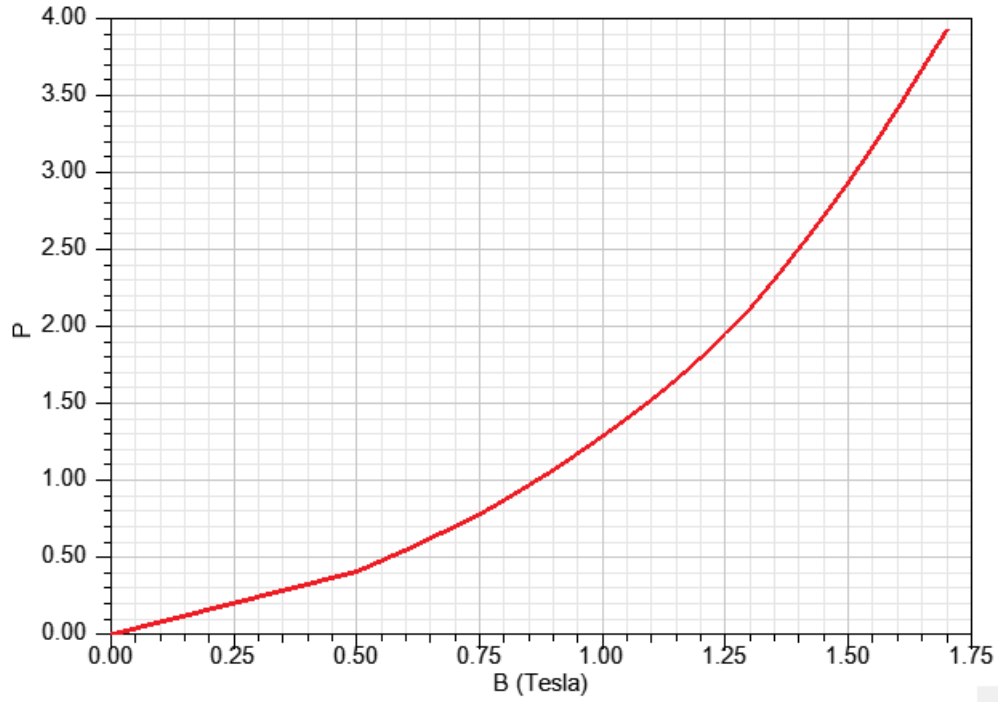
Parametre	Değer
Stator Dış Çapı	324 mm
Stator İç Çapı	216 mm
Stator Nüve Uzunluğu	65 mm
Nüve Paketleme Faktörü	0.95
Stator Oyuk Sayısı	24



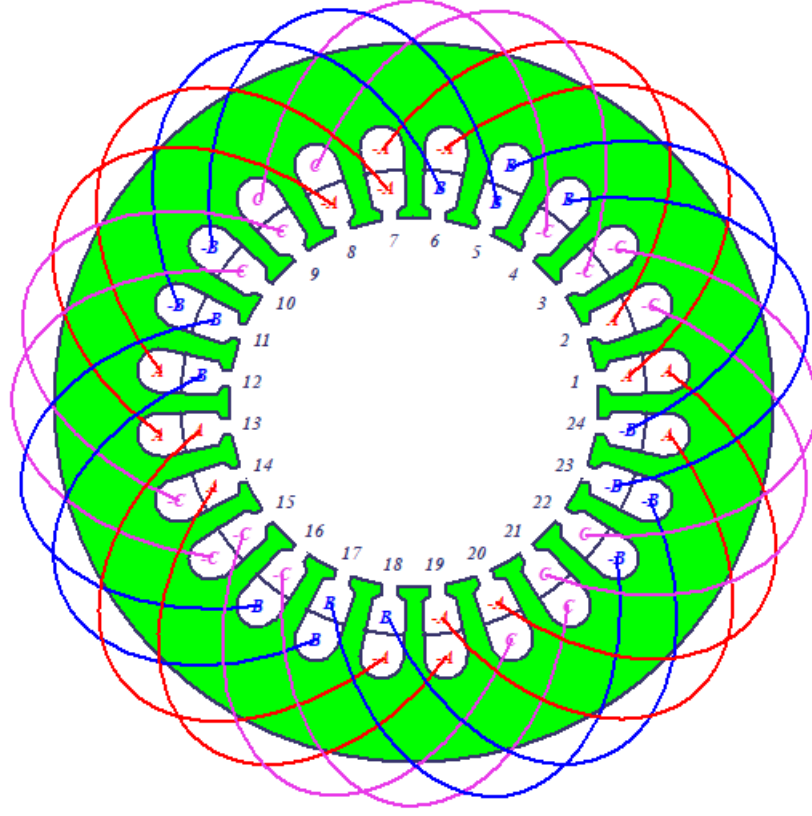
Stator Oyuk Boyutları	
Hs0	0.5 mm
Hs2	8 mm
Bs0	2.5 mm
Bs1	16.37 mm
Bs2	18.48 mm



Şekil 3.1: Stator nüve malzemesinin B-H karakteristiği.



Şekil 3.2: Stator nüve malzemesinin 50 Hz için B-P (çekirdek kaybı) karakteristiği.

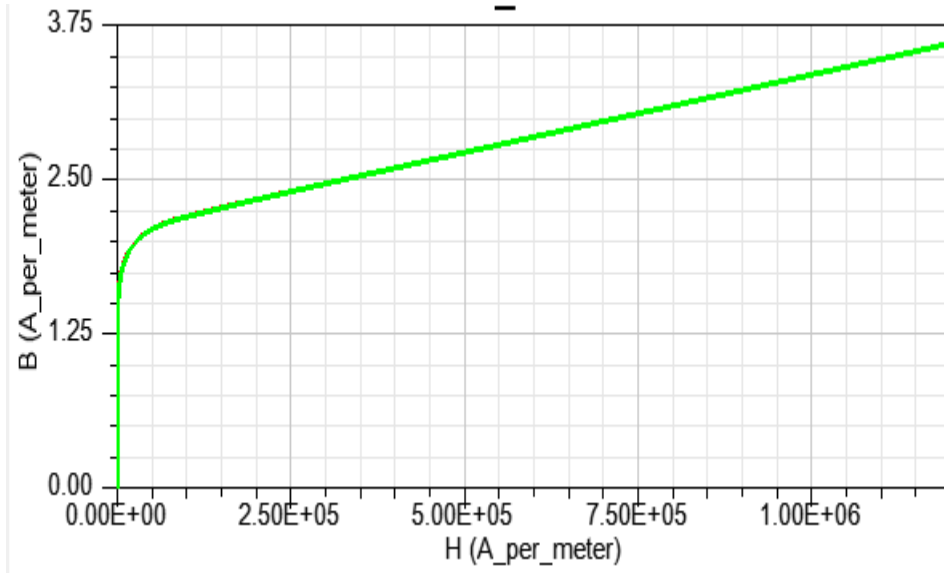


Şekil 3.3: Stator sargı dağılımı.

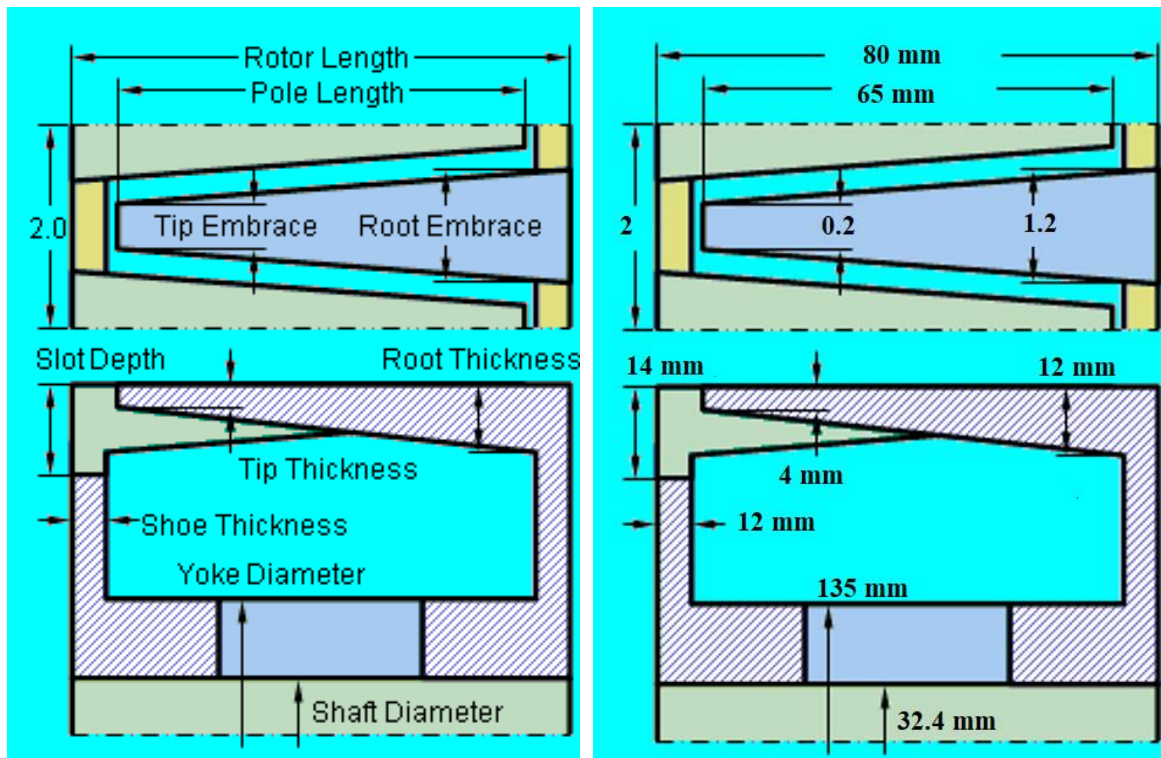
Tez çalışmasında kullanılan makinenin rotor boyutları Tablo 3.2’de verilmiştir. Rotor nüvesinde 1008 çeliği seçilmiştir. Nüve malzemesinin B-H karakteristik eğrisi Şekil 3.4’de, rotor kutbunun kesit resmi Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil üzerinde RMxprt geçen parametre isimleri ve değerleri belirtilmiştir. PKSG’de uyarım mıknatısla yapılmaktadır. Mıknatis olarak yazılımın kütüphanesinde bulunan “XG196/96” malzeme seçilmiştir. Mıknatis kalınlığı 11 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2: Rotor nüvesinin boyutları.

Parametre	Değer
Rotor Dış Çapı	212.76 mm
Stator İç Çapı	32.4 mm
Stator Nüve Uzunluğu	80 mm



Şekil 3.4: Rotor nüve malzemesinin B-H karakteristiği.

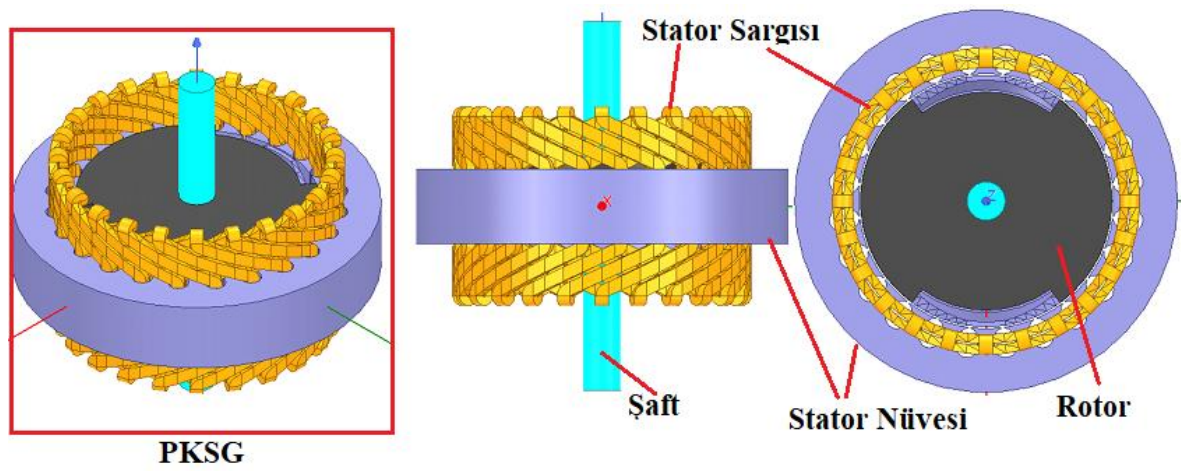


Şekil 3.5: Rotor kutbunun kesiti ve parametre değerleri.

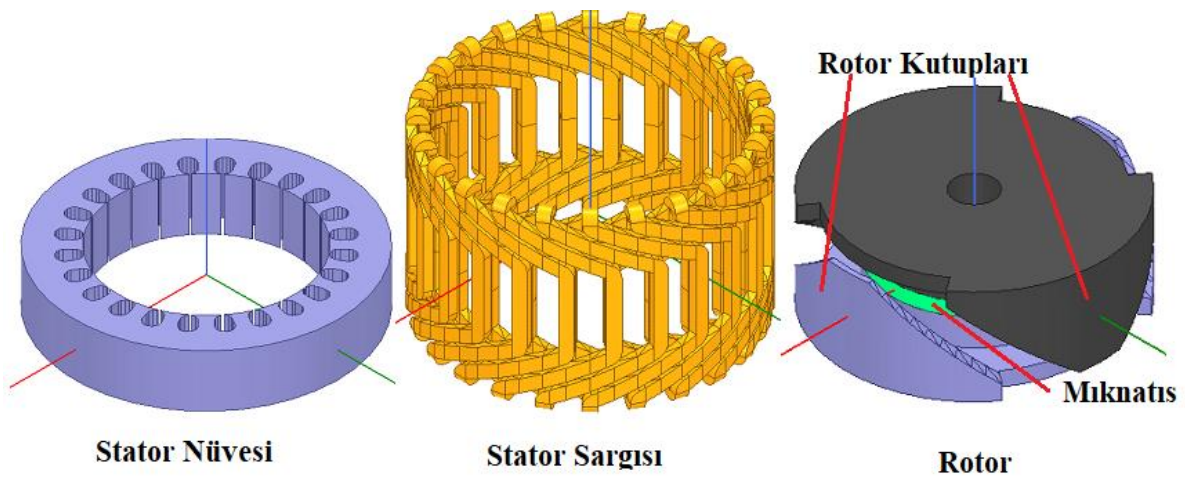
3.3 Maxwell 3D'de PKSG'nin Modellenmesi

Maxwell 3D, 3 boyutlu SEY temelli analiz için Ansys Maxwell yazılımında bulunan bir modüldür. PKSG'nin hem tasarımının iyileştirilmesi hem de teze konu olan parametrik analizlerinin gerçekleştirilmesi için RMXprt'de elde edilen ön tasarım Maxwell 3D ortamına aktarılmıştır.

PKSG'nin Maxwell 3D'ye aktarılan 3 boyutlu modelinin detaylı görünümü Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir.

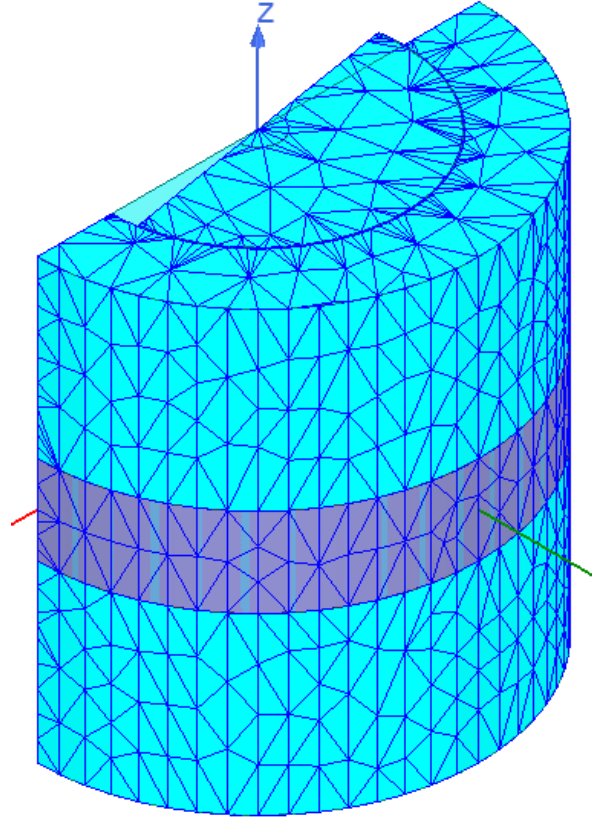


Şekil 3.6: 3 boyutlu modelin farklı açılardan Maxwell ortamındaki görüntüleri.



Şekil 3.7: 3 boyutlu modelin parçalarının Maxwell ortamındaki görüntüleri.

Analizler, bilgisayarda işlem yükünün azaltılması dolayısıyla analiz süresinin düşürülmesi için makinenin yarısı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kısım 3.1’de belirtildiği üzere SEY ile analiz için makine geometrisinin ağ örüntüsünün yapılması gereklidir. Buna göre, Maxwell Ansys’te otomatik oluşturulan ağ örüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu 3B ağ örüntüsü 90037 elemandan oluşmaktadır.



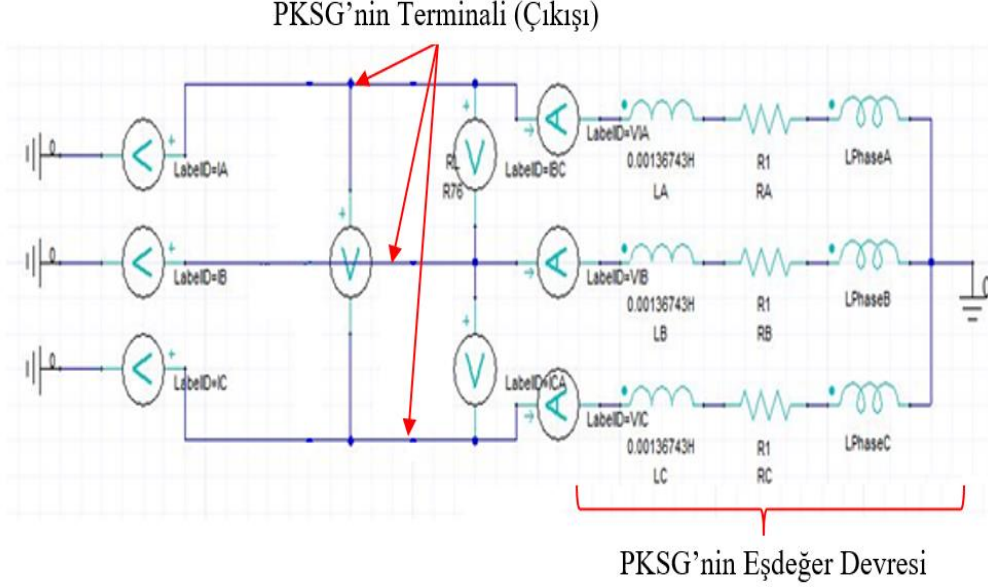
Şekil 3.8: Modellenen makinenin 3 boyutlu ağ örüntüsü.

3.4 Maxwell Circuit Editör’de Eşdeğer Devrenin Oluşturulması

Maxwell yazılımında sargıların tanımlanması Maxwell 3D modülü üzerinden yapılmaktadır. Ancak burada sargılara ilave devre bağlantıları yapılamamaktadır. Makinelerin sargılarına bağlanacak olan devrelerin 3B modele entegrasyonu iki yolla yapılabilmektedir. Bunlardan biri Maxwell Circuit Editor, diğeri ise Simplorer ortamıdır. Bu tez çalışmasında Maxwell Circuit Editor ile devreler oluşturularak analizler yapılmıştır.

Maxwell 3D’de modellenmiş kalıcı mıknatıslı PKSG’nin Maxwell Circuit Editör ortamına aktarılmış eşdeğer devresi Şekil 3.9’da verilmiştir. Bu devrede generatörün terminal faz

gerilimlerini, terminal hat gerilimlerini ve terminal akımını ölçmek için voltmetre ve ampermetreler yerleştirilmiştir. Ancak devrede yük mevcut değildir.



Şekil 3.9: Modellenen kalıcı mıknatıslı PKSG'nin Maxwell Circuit Editör'de oluşturulmuş eşdeğer devresi.

3.5 Sonuç

Bu bölümde tez kapsamında simülasyon temelli analizlerde dikkate alınan 1.5 kVA, 150 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG'nin 3B SEY modeli sunulmuştur. Dikkate alınan model Ansys Maxwell'in kütüphanesinde yer alan 0.55 kVA, 115 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG boyutları revize edilerek türetilmiştir.

Buna göre, ilk olarak kütüphanedeki model başlangıç kabul edilerek, 1.5 kVA, 150 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG makinenin ön tasarımı Ansys Maxwell'in bir aracı olan RMXprt ile oluşturulmuştur. Daha sonra, PKSG'nin hem tasarımının iyileştirilmesi hem de teze konu olan parametrik analizlerinin gerçekleştirilmesi için RMXprt'de elde edilen generatör modeli Maxwell 3D ortamına aktarılmıştır.

Son olarak, generatörün yükte çalışma durumlarını analiz edebilmek için Maxwell 3D ortamındaki generatör modelinin Maxwell Circuit Editör ortamında eşdeğer devresi oluşturulmuştur.

4. MODELLENEN PKSG'NİN BOŞTA VE YÜK ALTINDA PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde sunulan model kullanılarak, doğrusal ve doğrusal olmayan yüklenme koşullarının PKSG'nin performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir. Doğrusal yük olarak saf omik yük ve doğrusal olmayan yük olarak 6 darbeli kontrolsüz doğrultucuya ait üç farklı devre durumu dikkate alınmıştır. 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu devresi temelli üç farklı yük durumu;

- **Durum 1:** d.a. tarafında sadece saf omik direnç olan ve girişinde herhangi bir harmonik filtreleme elemanı olmayan en basit 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu,
- **Durum 2:** d.a. tarafında saf omik dirence paralel bağlı yumuşatma kondansatörü (smoothing capacitor) olan ve girişinde herhangi bir harmonik filtreleme elemanı olmayan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu,
- **Durum 3:** d.a. tarafında saf omik dirence paralel bağlı yumuşatma kondansatörü olan ve girişinde yüksek frekanslı akım harmoniklerini tıkayan bir bobin (shoke inductor) olan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu,

olarak tanımlanabilir.

Performans parametresi olarak ise generatör terminalindeki hat gerilimi etkin değerleri, hat akımı ve hat gerilimi toplam harmonik bozulması değerleri, generatör kayıpları ve moment dalgalanmasının büyüklüğü analizlere dahil edilmiştir.

Bu performans parametrelerinin boşta çalışma ve çeşitli yüklenme durumlarındaki değerleri benzetim yoluyla hesaplanıp yorumlanmıştır. Ayrıca, 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafındaki yumuşatma kondansatör değeri ve a.a. tarafındaki yüksek frekanslı harmonikleri süzen bobin değerinin değişiminin de performans parametrelerine etkisi analiz edilmiştir.

Analizlerde generatör terminal gerilimleri ve terminal akımlarının harmoniklerine ait etkin değerleri (V_h , I_h), gerilim ve akım toplam harmonik bozulma indislerinin değerleri (THDV, THDI) [27] ve terminal gerilimlerinin gerçek etkin değeri (true rms value) [27] Ansys Maxwell'in kendi hesap araçları kullanılarak hesaplanmıştır. THDV, THDI ve terminal gerilimi gerçek etkin değeri (V_L) hesap ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} V_h^2}}{V_1} 100, \quad THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} I_h^2}}{I_1} 100 \quad (4.1)$$

$$V_L = \sqrt{\sum_{h \geq 1} V_h^2} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve (4.2)'de V_h ve I_h sembolleri gerilim ve akımın h . harmonik bileşenlerinin etkin değerlerini, V_1 ve I_1 sembolleri gerilim ve akımın temel harmonik (anma frekansı) bileşenlerinin etkin değerlerini temsil etmektedir.

Modellenen generatörün, analizler sırasında çekirdek ve sargı kayıplarının değerleri ile generatörden yükün çektiği aktif güç de yine Ansys Maxwell yazılımının araçları kullanılarak hesaplanmıştır. Burada yükün çektiği aktif güç her bir fazdan çekilen ortalama güçlerin (aktif güçlerin) toplamıdır [60]. Sargı kaybı ise rotorda uyarım sargısı olmadığı için stator sargılarının direncinden ve stator akımından kaynaklanan kayıptır.

Analizlerde toplam kaybın hesabında rüzgar ve sürtünme kayıpları ihmal edilmiş, çekirdek ve sargı kayıpları dikkate alınmıştır. Çekirdek kayıpları ise histerezis (P_H), eddy akımı (P_e) ve anormal eddy akımı (P_{ae}) kayıplarının toplamı olup bu üç kayıp her hangi bir f frekansı için maksimum manyetik alan yoğunluğu (B_{max}), histeresiz katsayısı (K_H), klasik eddy katsayısı (K_c) ve anormal eddy akımı katsayısı (K_e) cinsinden sırasıyla Denklem (4.3), (4.4) ve (4.5)'de verildiği gibi ifade edilebilir [56]:

$$P_H = K_H B_{max}^2 f \quad (4.3)$$

$$P_e = K_c B_{max}^2 f^2 \quad (4.4)$$

$$P_{ae} = K_e B_{max}^{1.5} f^{1.5} \quad (4.5)$$

Bunlara ilaveten, generatör mili momentinin bağlı dalgalanması (MBD), sürekli çalışma durumundaki en büyük (M_{maks}) ve en küçük (M_{min}) moment değerlerinin farkının ortalama moment (M_{ort}) değerine yüzde oranı şeklinde hesap edilmiştir:

$$MBD = 100 \frac{(M_{maks} - M_{min})}{M_{ort}} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki generatör performans parametrelerine ilaveten 6 darbeleri kontrolsüz doğrultucu yük durumlarında, d.a. gerilimin bağıl dalgalanma miktarının yüzde değeri (GBD) analizlerde incelenmiştir. GBD, d.a. gerilimin en büyük anlık değeri (V_{maks}), en küçük anlık değeri (V_{min}) ve ortalama değeri (V_{ort}) cinsinden aşağıda verilen ifadeyle hesaplanmıştır:

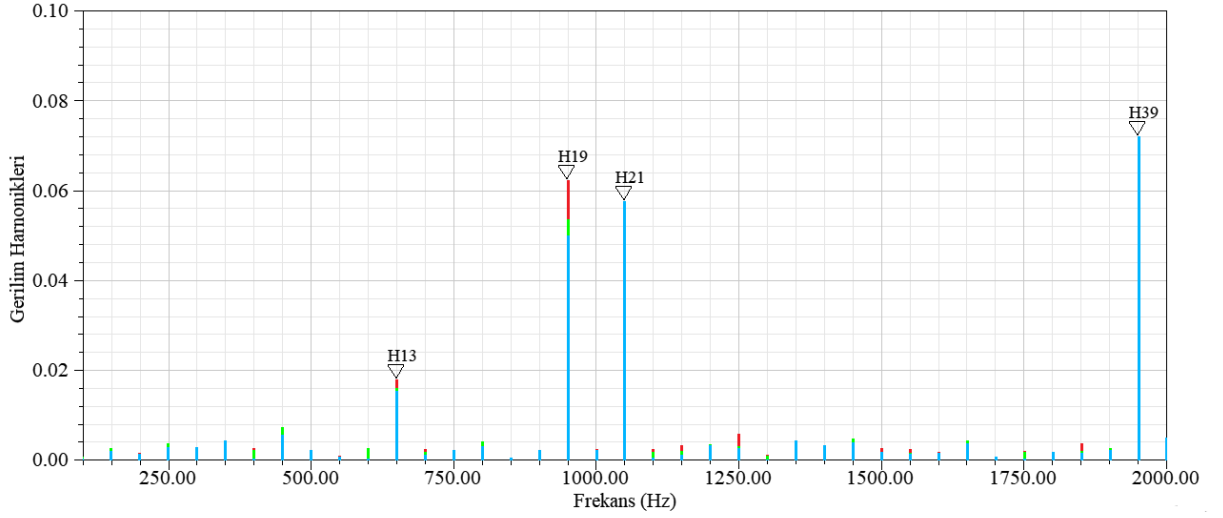
$$GBD = 100 \frac{(V_{maks} - V_{min})}{V_{ort}} \quad (4.7)$$

4.1 Boşta Çalışma Koşulları İçin Performans Analizi

Burada, modellenen kalıcı mıknatıslı PKSG'nin boşta çalışma altında terminal hat gerilimlerinin harmonik spektrumları ve etkin değeri ile boşta çalışma (çekirdek) kaybı değerlendirilmiştir.

Terminal hat gerilimlerinin harmonik bileşenlerinin büyüklükleri, temel harmonik bileşenine oranları cinsinden Şekil 4.1'de sunulmuştur. Şekilde mavi, yeşil ve kırmızı çizgiler üç faza ait harmonik bileşenleri göstermektedir.

Sunulan harmonik spektrumdan, hat gerilimlerinin önemli derecede harmonik bozulmaya sahip olduğu ve baskın harmonik bileşenlerinin 7., 13., 19., 21. ve 39. harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca özellikle, 13. ve 19. harmonik numaraları için hat gerilimleri arasında bir dengesizlik olduğu belirtilebilir. Terminal hat gerilimlerinin etkin değerleri ve THDV değerleri yaklaşık olarak 186 V ve %14'dür. Generatörün boşta kaybı ise 19.45 W değerindedir.

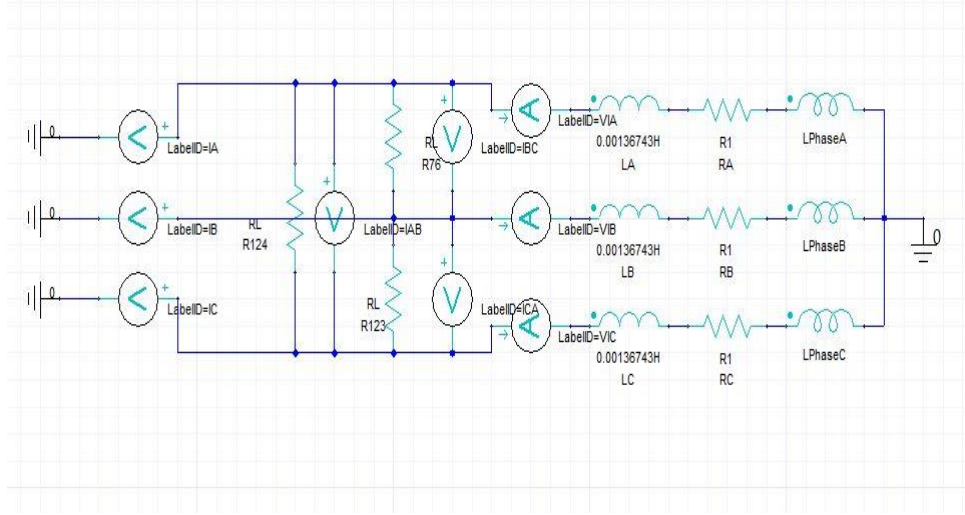


Şekil 4.1: Boşta çalışma durumunda terminal hat gerilimlerinin harmonik spektrumları.

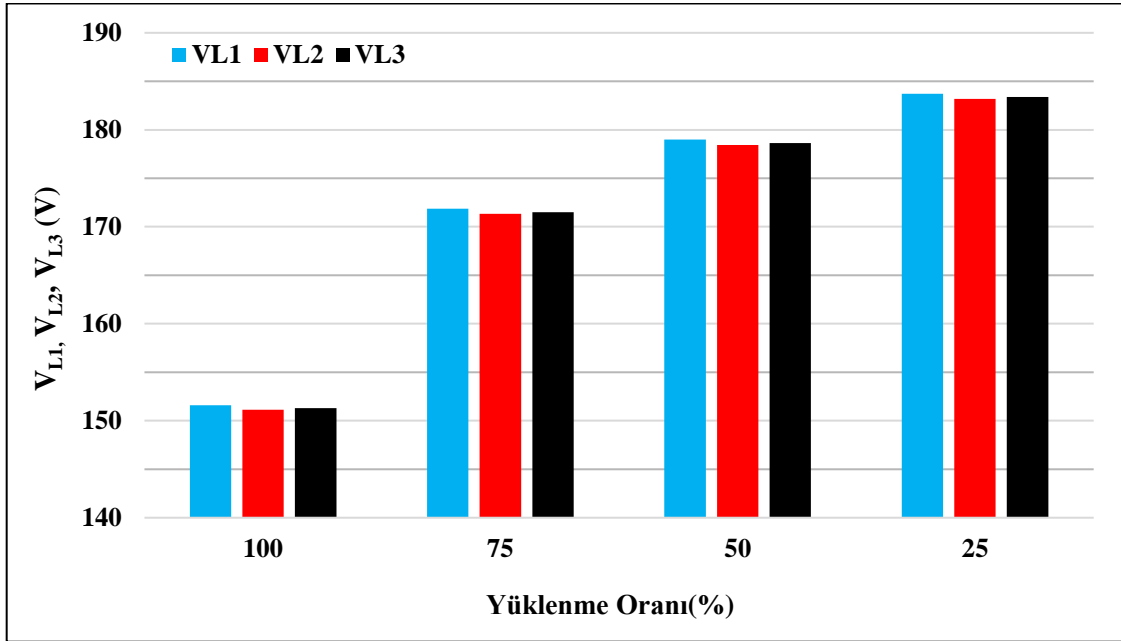
4.2 Doğrusal (Saf Omik) Yük Altında Performans Analizi

Bu kısımda, kalıcı mıknatıslı PKSG'ye doğrusal yüklenmenin etkileri incelenmiştir. Analizler sırasında, generatör tam yükte (%100) çalışma durumundan başlayarak, %75, %50 ve %25 yüklenme durumları test edilmiştir. Dikkate alınan test sistemi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, doğrusal yük olarak üçgen bağlı saf omik direnç kullanılmıştır.

Şekil 4.3'de doğrusal yük altında dört farklı yüklenme oranı (%25, %50, %75 ve %100) için PKSG'nin terminal hat gerilim etkin değerleri ($V_{L1, L2, L3}$) sunulmuştur. Bu şekilden, terminal gerilimleri arasında özellikle yüksek yüklenme oranlarında dengesizlik olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, %100, %75, %50 ve %25 yüklenme oranları için generatör terminal hat gerilimi etkin değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 151 V, 171 V, 178 V ve 183 V'dir. Buradan, modellenen PKSG için yüklenme oranı azaldıkça terminal gerilimi etkin değerinin önemli derecede arttığı ifade edilebilir.

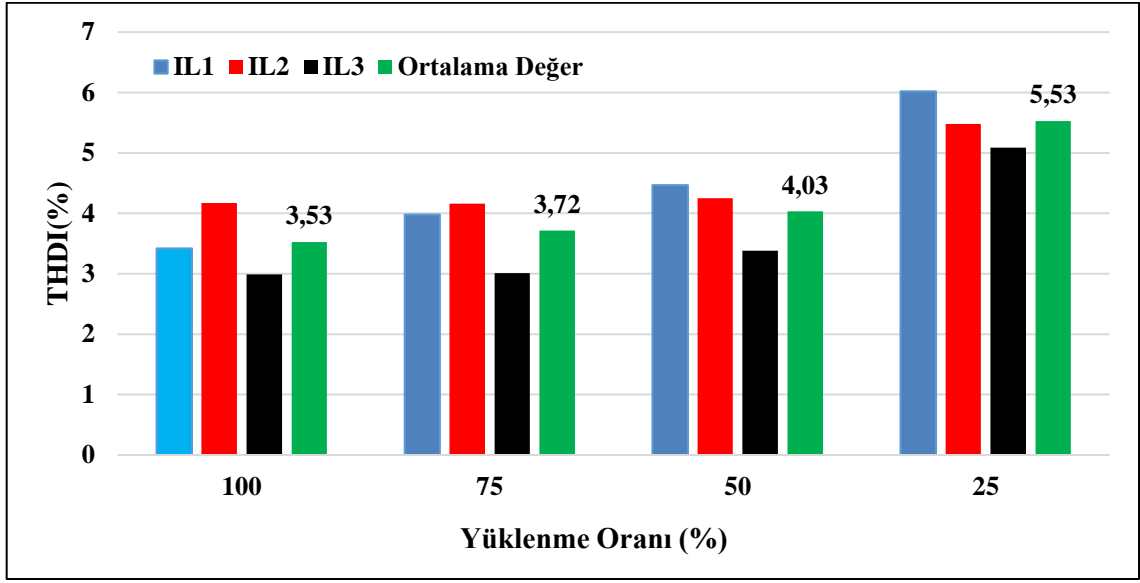


Şekil 4.2: PKSG'nin doğrusal yük için oluşturulan analiz sistemi.

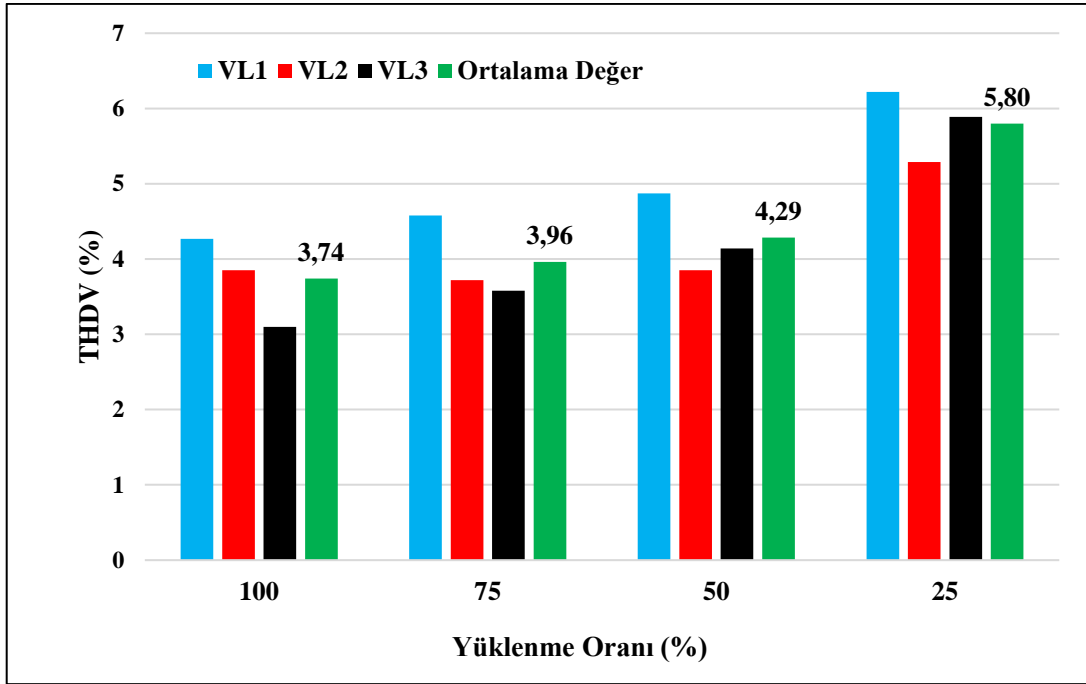


Şekil 4.3: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.

Aynı yükleme koşulları altında, PKSG'nin terminalinde ölçülen akımlara ve hat gerilimlerine ait toplam harmonik bozulma miktarları (THDI ve THDV) Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.4: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.

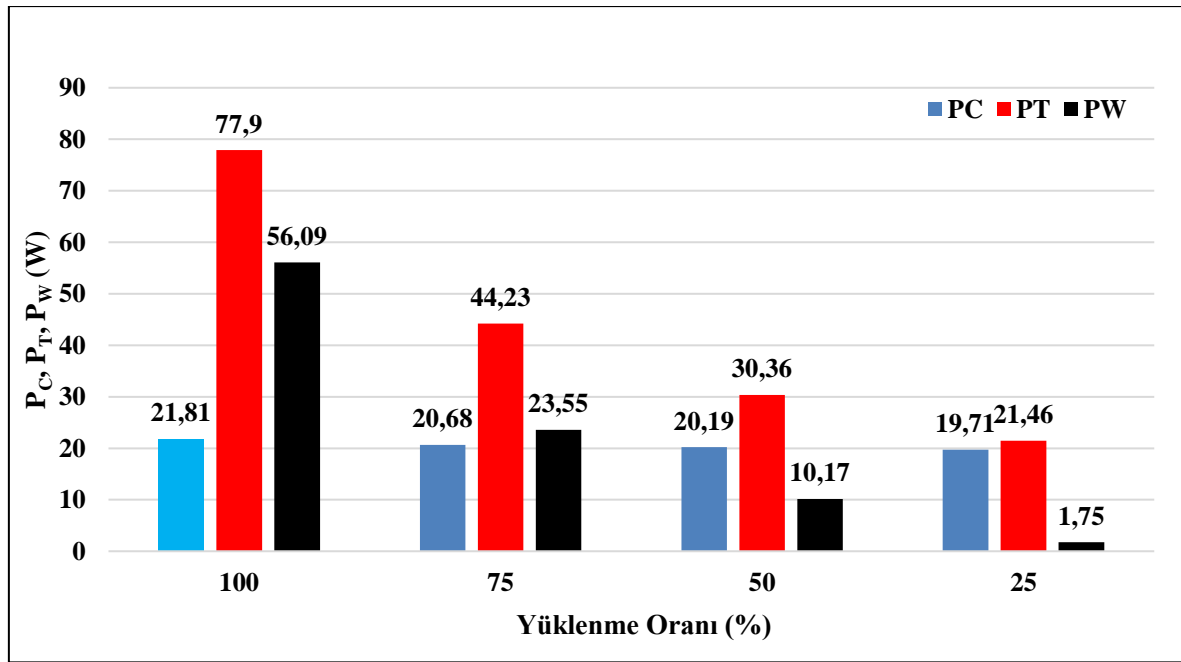


Şekil 4.5: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.

Şekil 4.4'e göre, THDI değerlerinin azalan yüklenme oranıyla arttığı belirtilebilir. Terminal akımlarının ortalama THDI değeri tam yüklenme durumu için %3.53 iken, %75 yüklenme durumunda %3.72, %50 yüklenme durumunda %4.03 ve %25 yüklenme durumunda %5.53'dür.

Şekil 4.5'den, THDV değerlerinin azalan yükleme oranıyla önemli derecede arttığı belirtilebilir. Bu durum daha önce ifade edilen boşta çalışma durumundaki %14 seviyesi dikkate alındığında daha net görülmektedir. Ayrıca, yükün saf omik karakterde olması sebebiyle analiz edilen %25 ile %100 arası yüklenme oranları için THDV ve THDI değerleri birbirine çok yakındır.

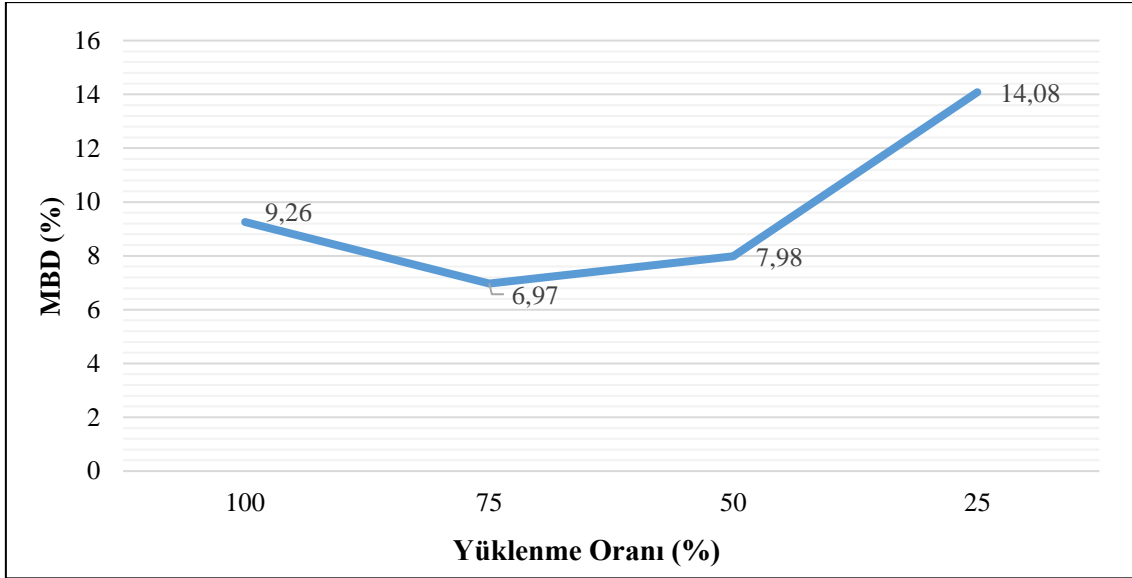
Doğrusal yük tipi altında dört farklı yükleme oranı için PKSG'nin çekirdek (P_C), sargı (P_W) ve toplam (P_T) kayıpların değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6: Doğrusal yük altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin kayıpları.

Şekil 4.6'dan görüleceği üzere, tam yükleme, %75, %50 ve %25 yüklenme oranları için P_W değerleri sırasıyla 56.09, 23.55, 10.17 ve 1.75 W'dır. P_C , yüklenmedeki azalışla birlikte düşüş eğilimi göstermiş ve tam yükleme, %75, %50 ve %25 yüklenme oranları için sırasıyla 21.81, 20.68, 20.19 ve 19.71 W değerlerini almıştır. P_T ise tam yüklenmeden %25 yüklenmeye doğru sırasıyla 77.90, 44.23, 30.36 ve 21.46 W değerlerini almıştır.

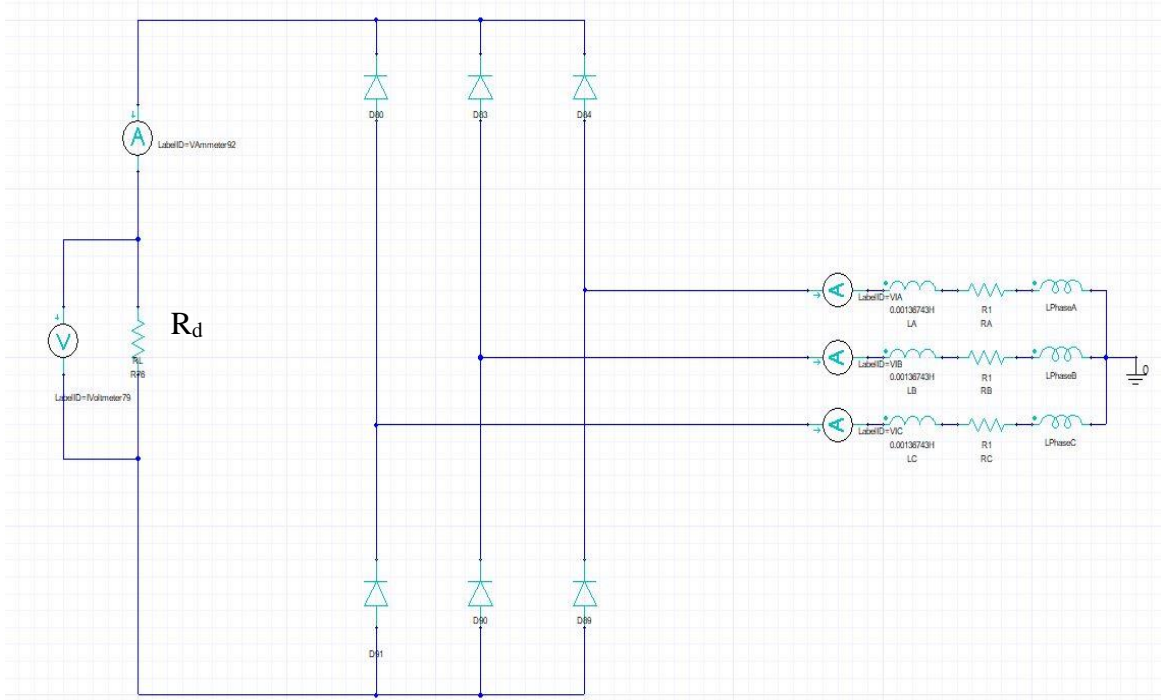
Doğrusal yük için son olarak yüklenme oranıyla PKSG'nin momentinin bağıl dalgalanma değerinin (MBD) değişimi Şekil 4.7'de çizdirilmiştir. Çizdirilen şekilden, bu değişim eğrisinin %100, %75, %50 ve %25 yüklenme oranları için MBD'nin sırasıyla %9.26, %6.97, %7.98 ve %14.08 değerlerine ulaştığı ve minimumu %75 yüklenme oranı civarında olan bir parabolik eğri olduğu görülmektedir.



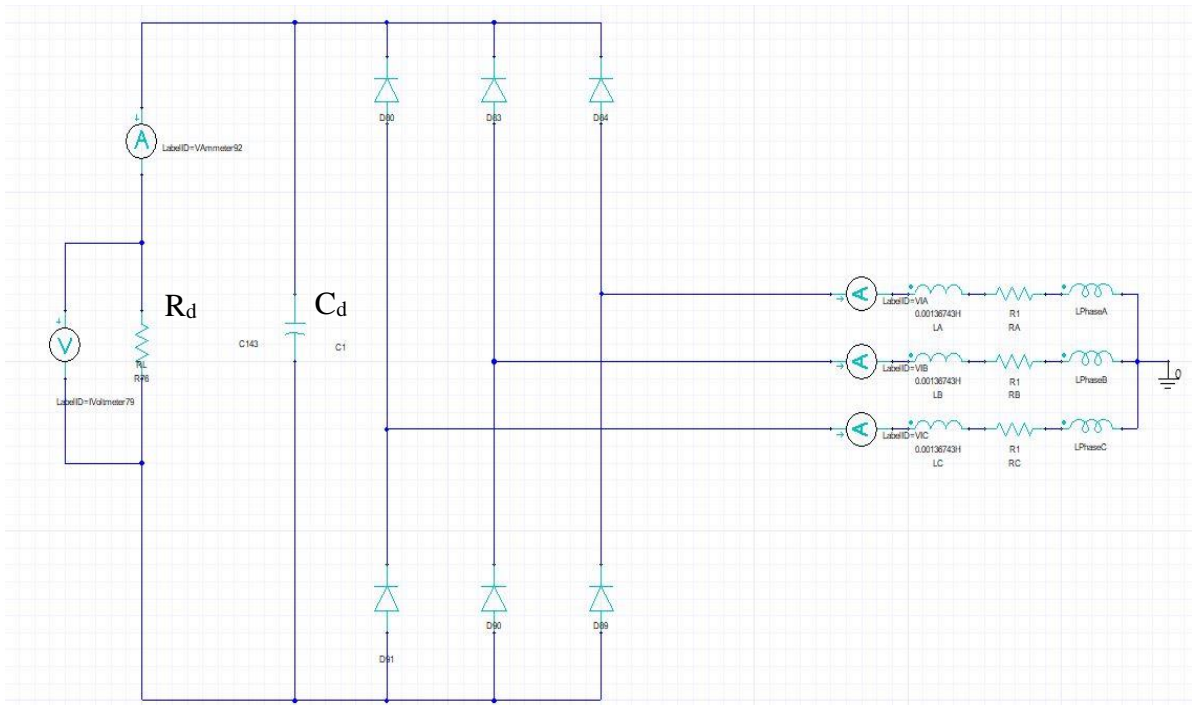
Şekil 4.7: Doğrusal yük için yüklenme oranıyla PKSG'nin MBD değerinin değişimi.

4.3 Doğrusal Olmayan (6 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucu) Yük Altında Performans Analizi

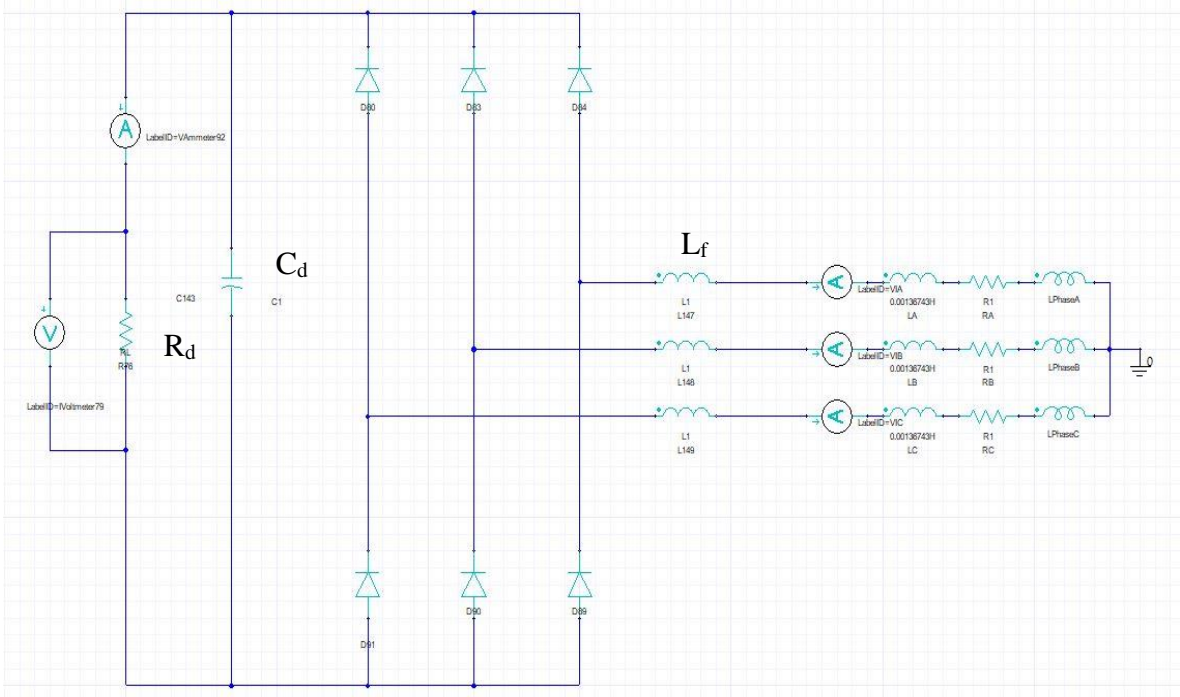
Bu kısımda, PKSG'nin performans parametreleri üzerinde doğrusal olmayan yüklenme koşullarının etkileri analiz edilmiştir. Doğrusal olmayan yüklenme koşulları, 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu kullanılarak oluşturulmuştur. 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu hem otomotiv sektöründeki güç devresinde bulunması hem de endüstride yaygın olarak kullanımı sebebiyle tercih edilmiştir. 6 darbeli doğrultucu yükü için daha önce tanıtılan üç farklı durum dikkate alınmıştır. Dikkate alınan üç durum için analiz sisteminin Maxwell Circuit Editör'deki görünümleri sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.8: 6 darbeleri doğrultucunun 1. durumu için analiz sistemi.



Şekil 4.9: 6 darbeleri doğrultucunun 2. durumu için analiz sistemi.

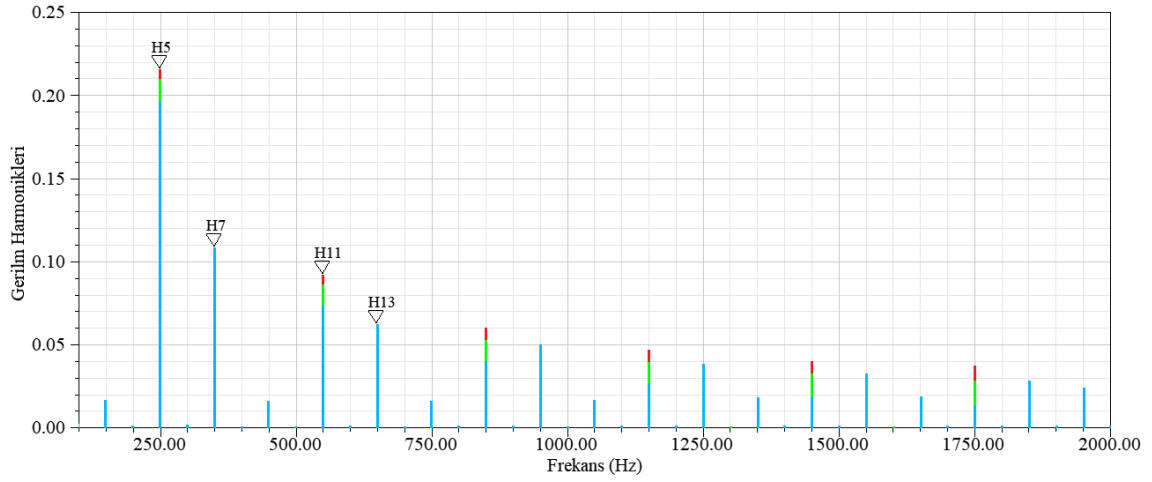


Şekil 4.10: 6 darbeli doğrultucunun 3. durumu için analiz sistemi.

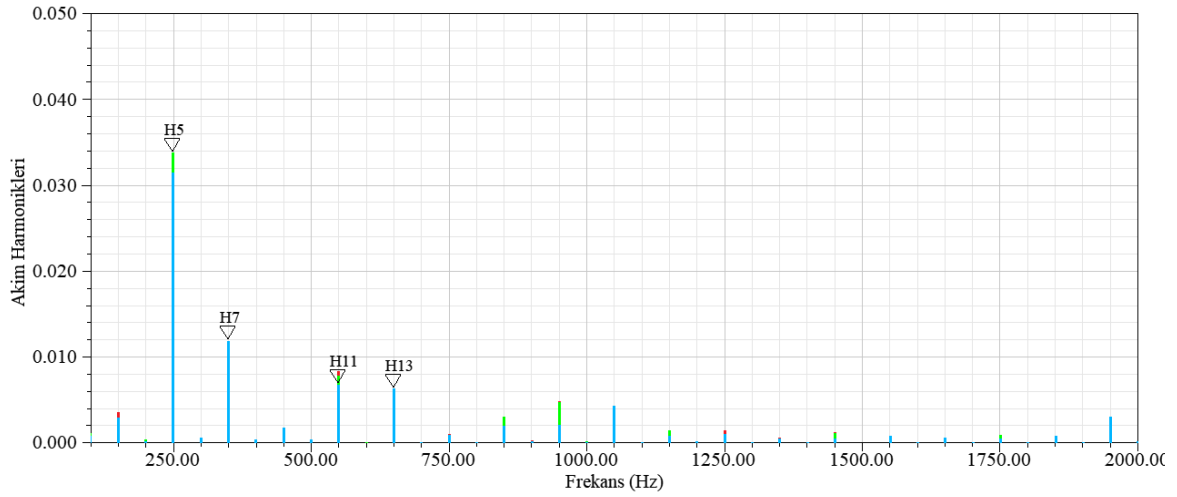
4.3.1 Doğrultucu Devresinin 1. Durumu için Analiz Sonuçları

Analizler, Şekil 4.8’de gösterilen sistemde, generatörün % 100, % 75, % 50 ve % 25 yüklenme oranları için gerçekleştirilmiştir. Yüklenme oranı d.a. tarafındaki yük direncinin (R_d) ayarlanmasıyla değiştirilmiştir.

Tam (% 100) yüklenme durumunda, terminal hat gerilimleri ve terminal akımlarının (yük akımlarının) harmonik spektrumlarına ait Ansys Maxwell ortamında elde edilen grafikler Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu şekillerde harmoniklerin büyüklükleri temel harmonik bileşen cinsinden bağıl değer olarak verilmiştir. Şekil 4.11’den PKSG’nin terminal hat gerilimleri ve hat akımlarının baskın harmoniklerinin, dikkate alınan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu yükün karakteristik akım harmonikleri olan 5, 7, 11, 13, 17 ve 19 numaralı harmonikler olduğu görülmektedir. Bu harmonikler arasında da özellikle 5. harmonik gerilimi ve akımının diğer harmonik gerilimleri ve akımlarına kıyasla daha büyük değerde olduğu belirtilebilir.



(a)

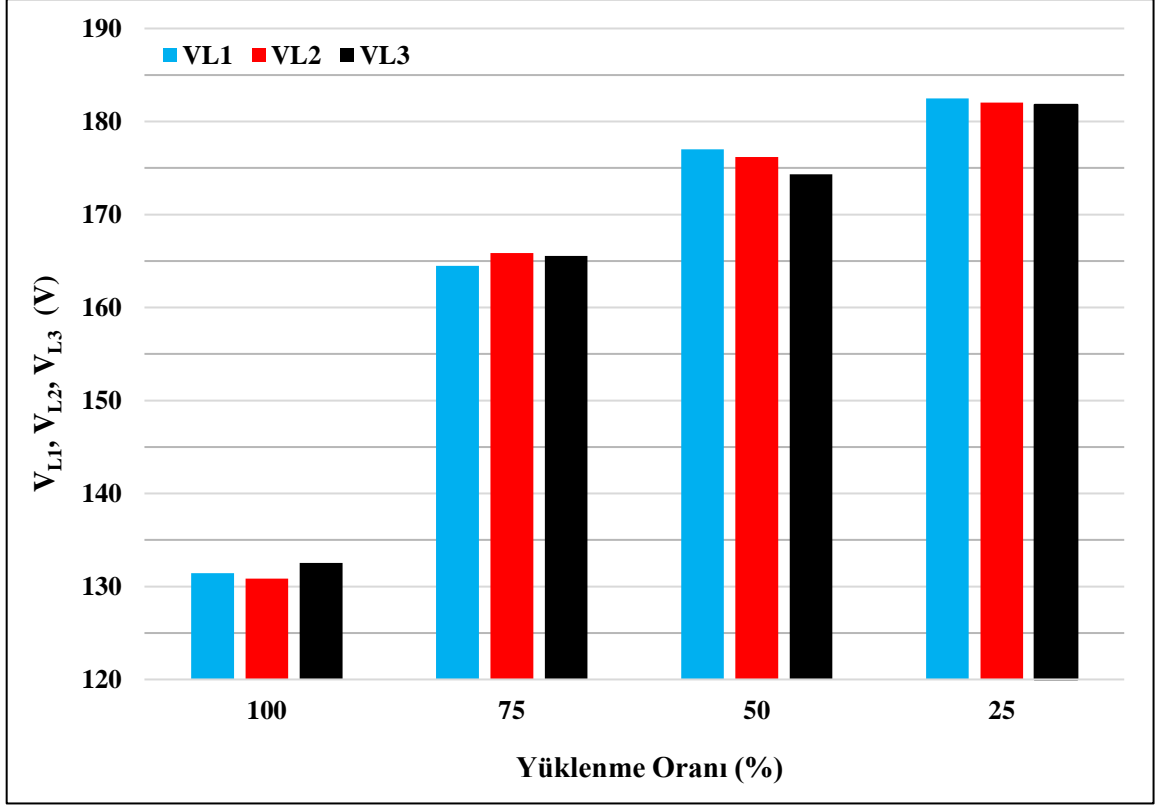


(b)

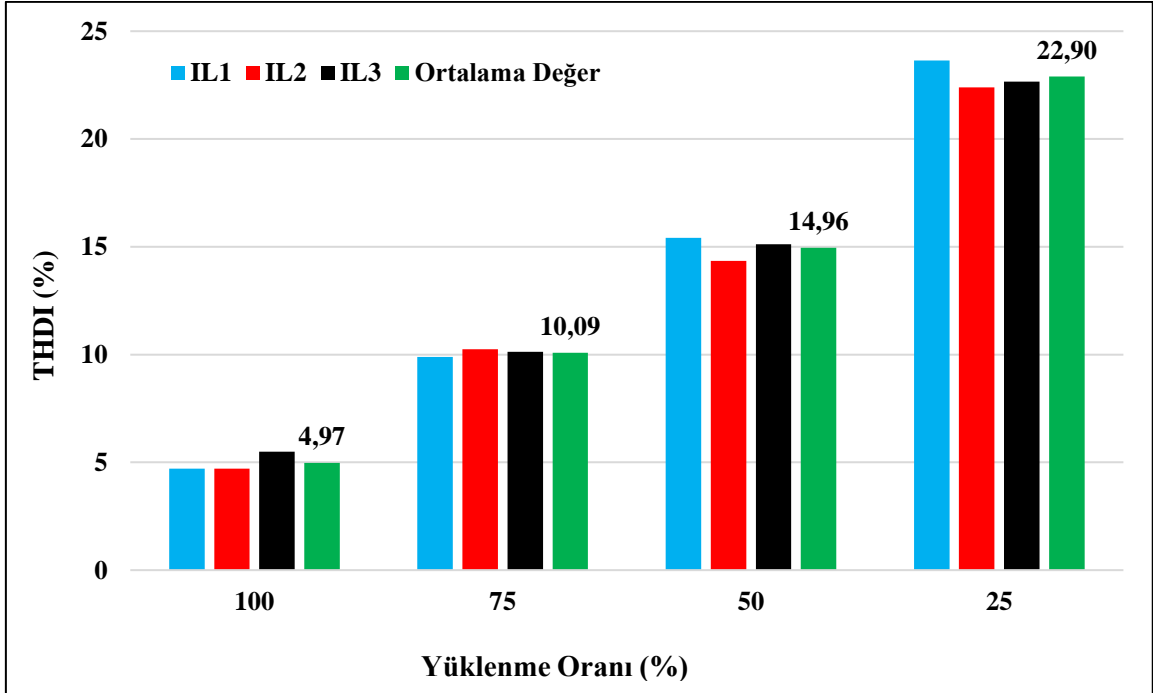
Şekil 4.11: 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 1) için PKSG'nin %100 yüklenme oranında (a) terminal hat gerilimleri ve (b) terminal akımlarının harmonik spektrumları.

6 darbeleri doğrultucunun dört farklı yüklenme oranı için terminal hat gerilimleri etkin değerleri Şekil 4.12'de sunulmuştur. Bu şekilde, %100, %75, %50 ve %25 yüklenme oranları için terminal gerilimi etkin değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak 131, 166, 176 ve 182 V değerlerinde olduğu görülmektedir. Burada, 6 darbeleri doğrultucu yük durumunda yüklenme oranının artışıyla PKSG'nin terminal gerilimindeki düşüşün doğrusal yük durumunda meydana gelen düşüşe kıyasla daha fazla olduğunu altı çizilmelidir.

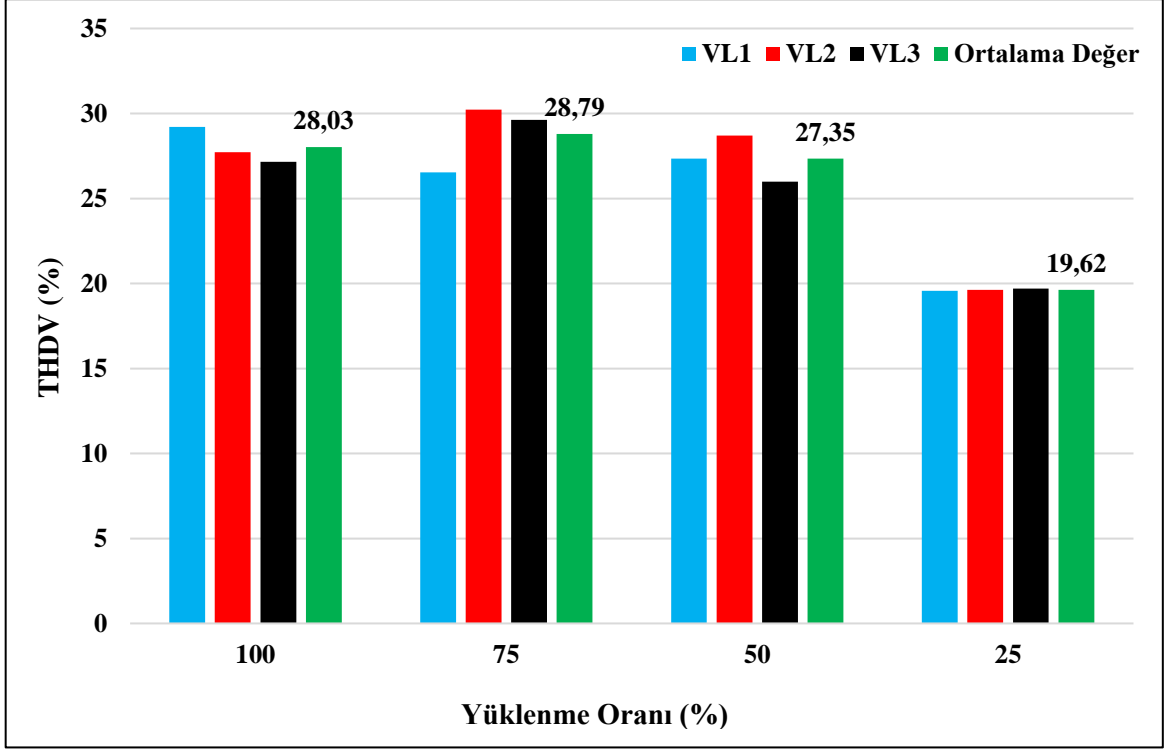
Aynı yüklenme koşulları için generatör terminalinde ölçülen THDI ve THDV değerleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.12: 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.



Şekil 4.13: 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.



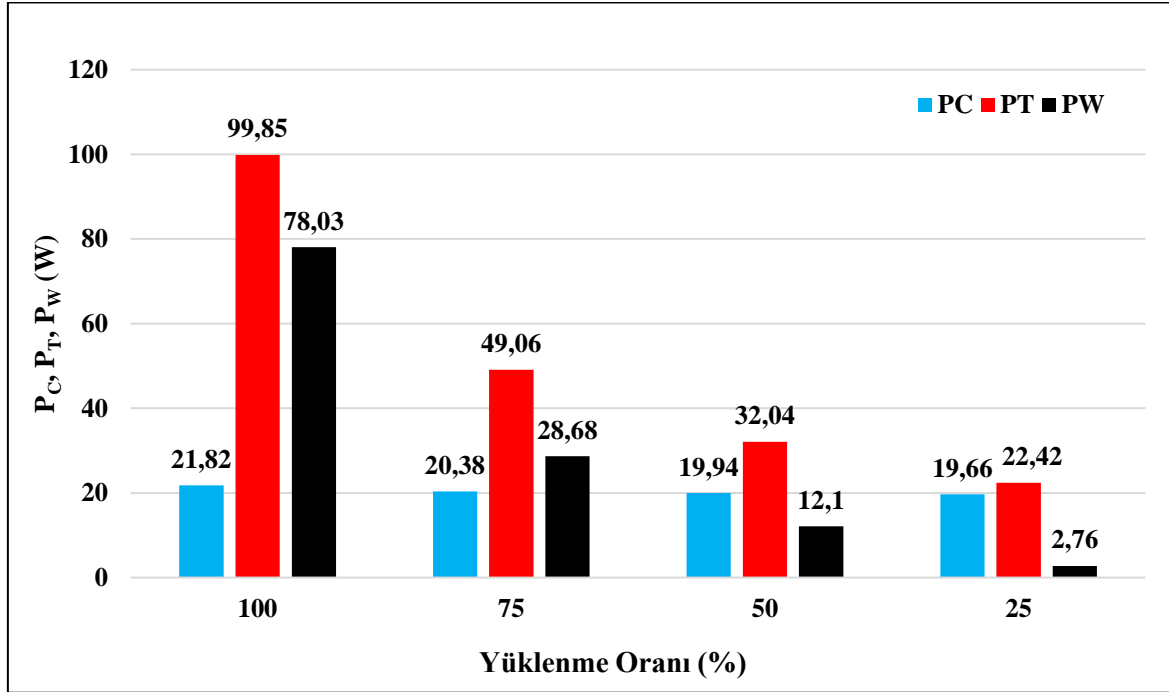
Şekil 4.14: 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.

Bu şekiller, yükleme oranı arttıkça THDI değerlerinin düştüğünü göstermektedir. Bunun sebebi, düşük yüklenme oranlarında diğer bir deyişle düşük akım seviyelerinde temel harmonik bileşenin harmonik bileşenlere kıyasla çok düşük seviyelerde olmasıdır. Bununla birlikte, THDI'nın ortalama değeri %100, %75, %50 ve %25 yüklenme durumlarında sırasıyla %4.97, %10.09, %14.96 ve %22.90'dır.

Diğer taraftan, THDV, boştaki çalışma durumunda sahip olduğu %14 değeri göz önüne alındığında, %50 oranına kadar olan yüklenme artışı sırasında önemli miktarda bir yükseliş göstermiş ve %27.35 değerine ulaşmıştır. %75 ve %100 yüklenme oranlarında ise %28 civarında değerler almıştır.

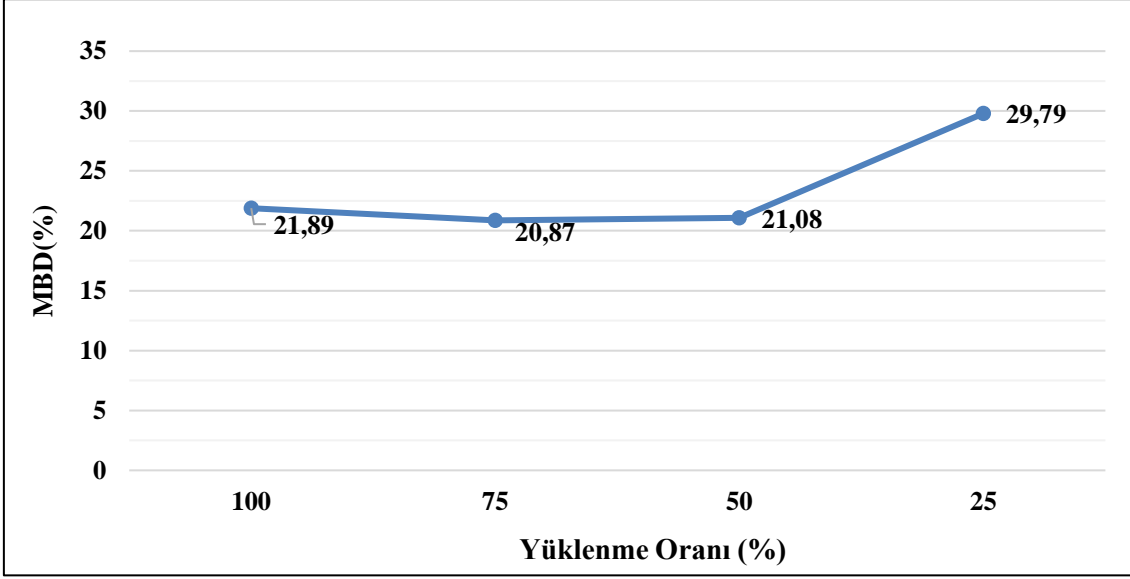
Şekil 4.15'den, P_w , P_T ve P_C değerlerinin sırasıyla tam yüklenme durumunda 78.03, 99.85 ve 21.82 W, %75 yüklenmede 28.68, 49.06 ve 20.38 W, %50 yüklenmede 12.10, 32.04 ve 19.94 W, %25 yüklenmede 2.76, 22.42 ve 19.66 W olarak hesaplanmıştır. Burada, yüklenme oranının artışıyla PKSG'nin P_w ve P_T değerindeki artışın, 6 darbeleri doğrultucu yük durumunda doğrusal yük durumuna kıyasla daha fazla olduğunun altı çizilmelidir. Bunun

sebebi, doğrusal olmayan yüklenme altında akım harmonik bozulmasının yüksek olmasına bağlı olarak frekansa bağlı sargı kayıplarının artış göstermesi şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 4.15: 6 darbeli doğrultucu yük (durum 1) altında çeşitli yüklenme oranları için PKSG'nin kayıpları.

6 darbeli doğrultucu yük için yüklenme oranıyla PKSG'nin MBD değerinin değişimi Şekil 4.16'da çizdirilmiştir. Çizdirilen şekilden, %25, %50, %75 ve %100 yüklenme oranları için MBD'nin sırasıyla %29.79, %21.08, %20.87 ve %21.89 değerlerine ulaştığı görülmektedir. Doğrusal saf omik yük için hesaplanan MBD değerleriyle karşılaştırıldığında 6 darbeli doğrultucu için hesaplanan MBD değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, her iki yük için elde edilen MBD-yüklenme oranı değişim eğrilerinin karakteristiğinin minimumu %75 yüklenme oranı civarında olan parabolik eğri olduğu belirtilmelidir.



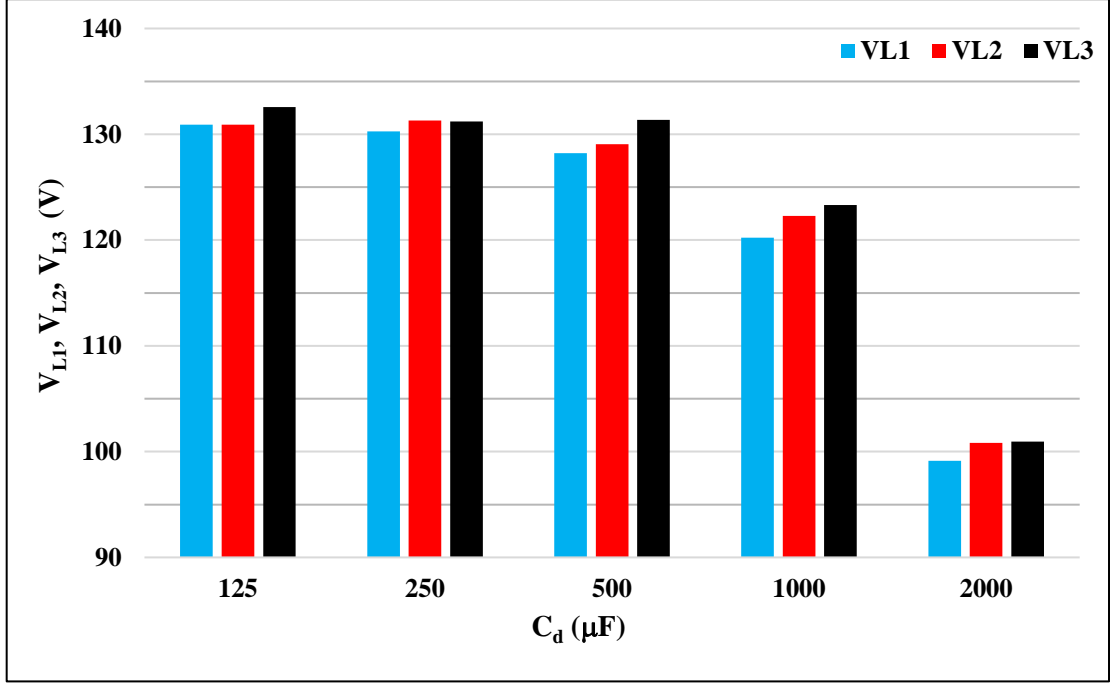
Şekil 4.16: 6 darbeleri doğrultucu yükü (durum 1) için yüklenme oranıyla PKSG'nin MBD değerinin değişimi.

4.3.2 Doğrultucu Devresinin 2. Durumu için Analiz Sonuçları

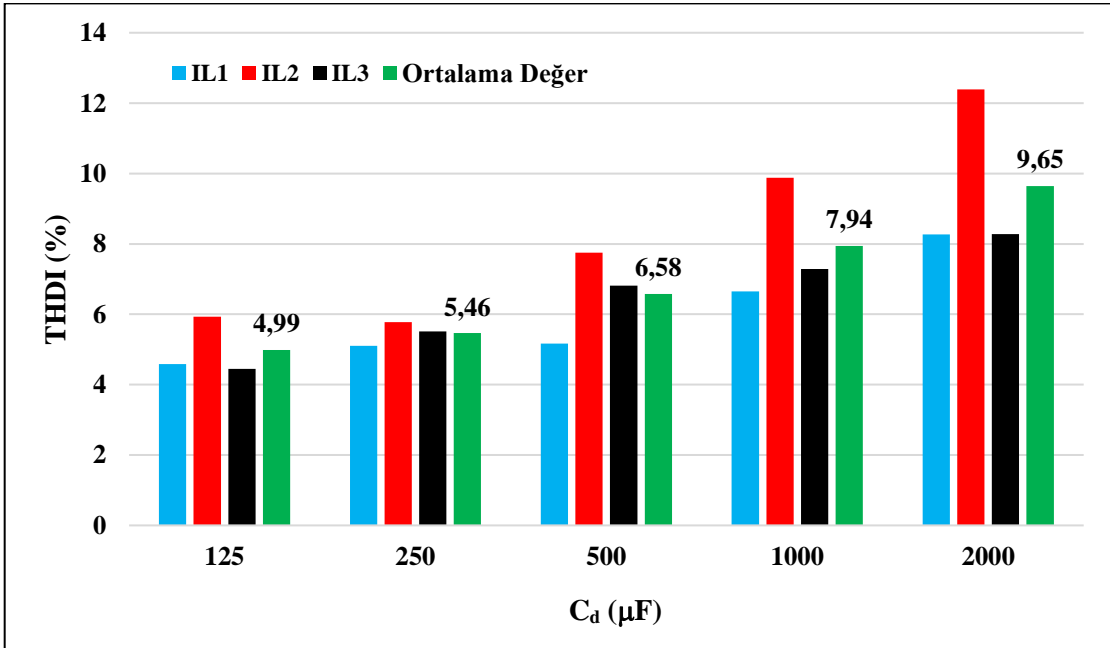
Burada, 6 darbeleri doğrultucu devresinin d.a. tarafına yumuşatıcı kondansatör bağlı durumu yani 2. durumu dikkate alınmıştır. Böylece, yumuşatıcı kondansatörün kapasite değerinin PKSG'nin performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir. Bu amaçla, Şekil 4.9'daki sistemde, yumuşatıcı kondansatörün 125, 250, 500, 1000 ve 2000 μF kapasite değerleri için benzetim temelli analizler yapılmıştır.

Bu kapasite değerleri için PKSG'nin terminal geriliminin etkin değerlerinin, terminal akımı THDI değerlerinin ve terminal gerilimi THDV değerlerinin değişimleri sırasıyla Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sunulmuştur.

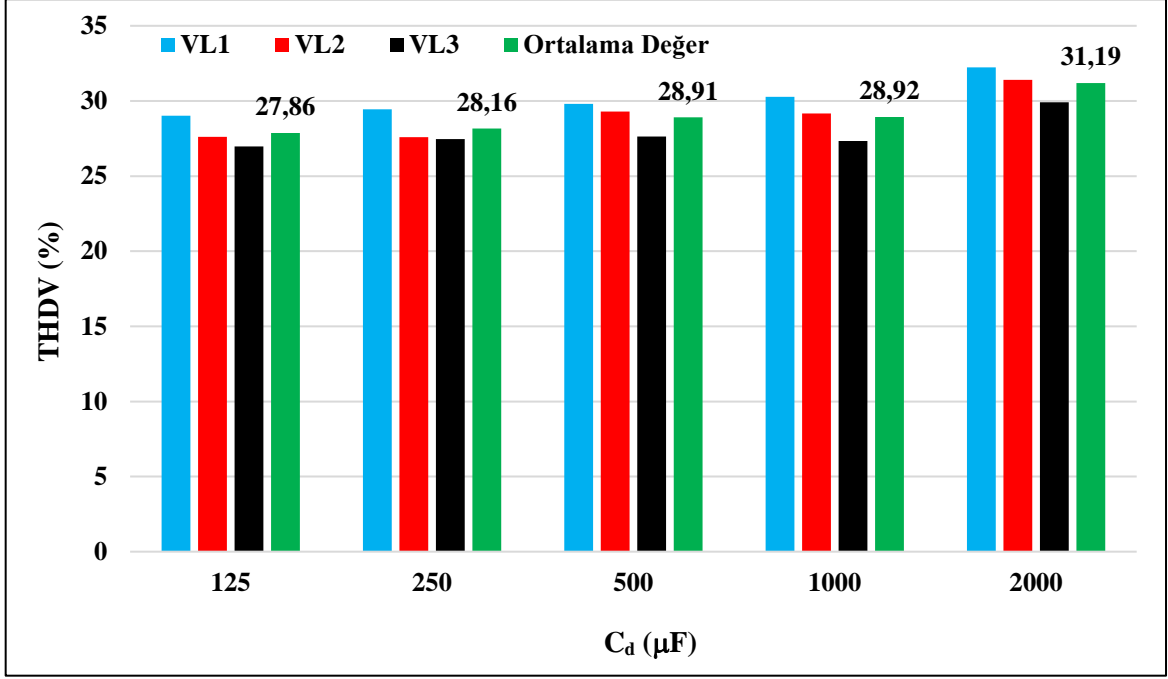
Şekil 4.17 yumuşatma kondansatörünün 125, 250, 500, 1000 ve 2000 μF 'lık kapasite değerleri (C_d) için terminal hat gerilimi etkin değerlerinin (V_L) ortalamalarının 131.46, 130.92, 129.53, 121.93 ve 100.30 V olduğunu göstermektedir. Buradan C_d 'nin artışıyla terminal gerilimi etkin değerinin önce ihmal edilebilir miktarda arttığı sonrasında ise önemli miktarda azaldığı ifade edilebilir. Bunun neticesinde, yük tarafından çekilen aktif güç 1534 W'dan 1334 W'a kadar düşmüştür.



Şekil 4.17: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.



Şekil 4.18: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.



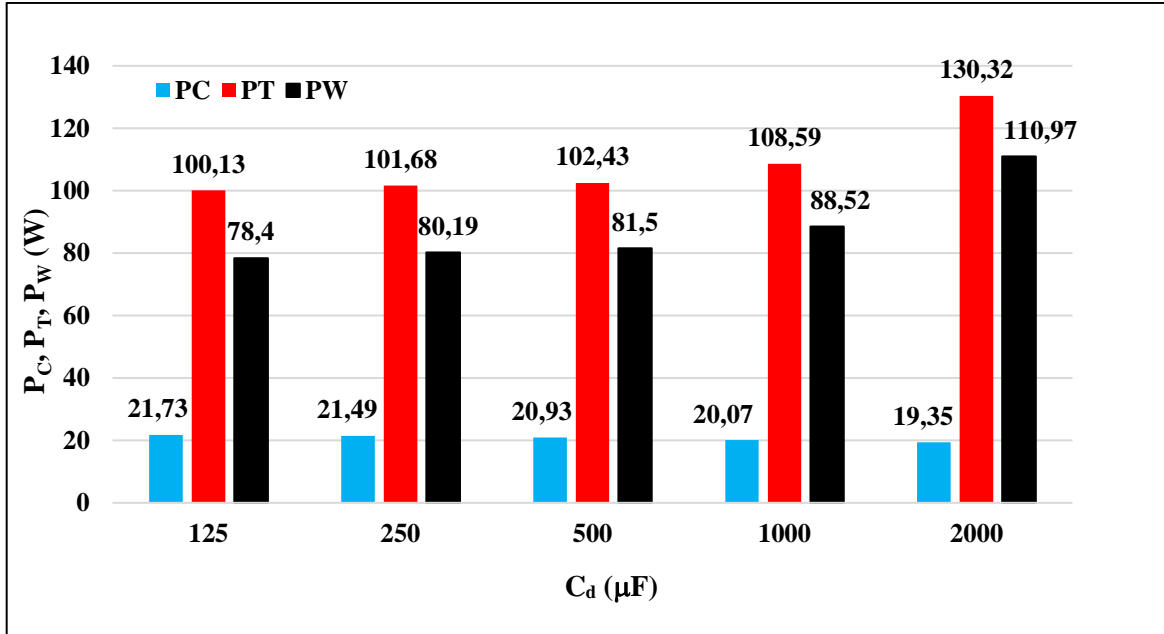
Şekil 4.19: 6 darbeli doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.

Şekil 4.18'den THDI'nın ortalama değerinin $125\mu\text{F}$ kapasite için %4.99, $250\mu\text{F}$ kapasite için %5.46, $500\mu\text{F}$ kapasite için %6.58, $1000\mu\text{F}$ kapasite için %7.94 ve $2000\mu\text{F}$ kapasite için %9.65 olduğu görülmektedir. Ayrıca, C_d 'nin artırılmasıyla birlikte terminal akımlarının THDI değerleri arasındaki farkın önemli ölçüde büyüdüğü bir başka ifadeyle akımlar arasındaki dengesizliğin arttığına da çizmeliyiz. Bu sonuçlar, yumuşatma kondansatörünün kapasite değerindeki artışın, 6 darbeli doğrultucunun PKSG'den çektiği akımın THDI değerini önemli miktarda kötüleştirdiğini işaret etmektedir.

Şekil 4.19 THDV'nin ortalama değerinin $125\mu\text{F}$ kapasite için %27.86, $250\mu\text{F}$ kapasite için %28.16, $500\mu\text{F}$ kapasite için %28.91, $1000\mu\text{F}$ kapasite için %28.92 ve $2000\mu\text{F}$ kapasite için %31.19 olduğunu göstermektedir. Buradan, THDI'ya paralel şekilde THDV'nin de yumuşatma kondansatörünün kapasite artışından olumsuz etkilendiği söylenebilir.

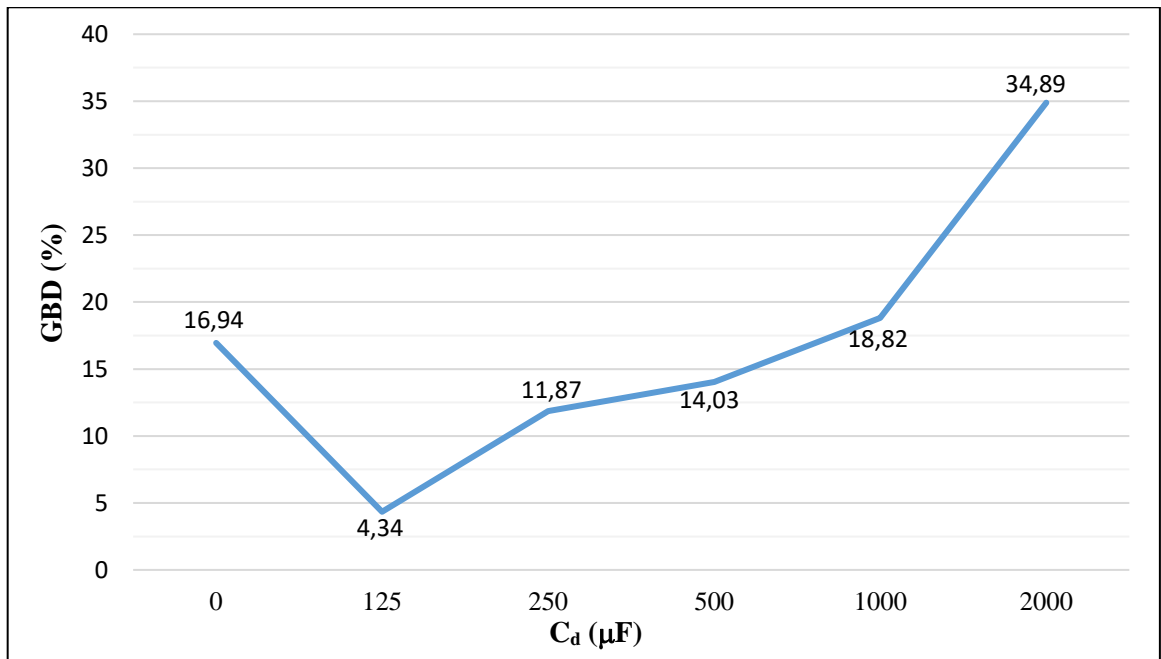
125 , 250 , 500 , 1000 ve $2000\mu\text{F}$ kapasite değerleri için çekirdek (P_C), sargı (P_W) ve toplam (P_T) kayıpların değerleri Şekil 4.20'de sunulmuştur. Şekle göre, $125\mu\text{F}$ kapasite için P_T , P_C ve P_W sırasıyla 100.13 , 21.73 ve 78.4 W'dır. $250\mu\text{F}$, $500\mu\text{F}$, $1000\mu\text{F}$ ve $2000\mu\text{F}$ kapasite değerleri için ise; P_T sırasıyla 101.68 , 102.43 , 108.59 ve 130.32 W, P_C sırasıyla 21.49 , 20.93 , 20.07 ve 19.35 W, P_W sırasıyla 80.19 , 81.50 , 88.52 ve 110.97 W olarak hesap edilmiştir. Bu

sonuçlardan, yumuşatma kondansatörünün kapasite değeri arttıkça generatörün P_C kaybının ihmal edilebilir seviyede azaldığı, P_T ve P_W kayıplarının ise artış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.20: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 2) çeşitli yumuşatma kapasitesi değerleri için PKSG'nin kayıpları.

Yumuşatma kapasitesinin 0 ile 2000 μF arasında değişimi için 6 darbeleri doğrultucu çıkışındaki doğrultulmuş gerilimin bağıl dalgalanma (GBD) oranının değişimi Şekil 4.21'de çizdirilmiştir.



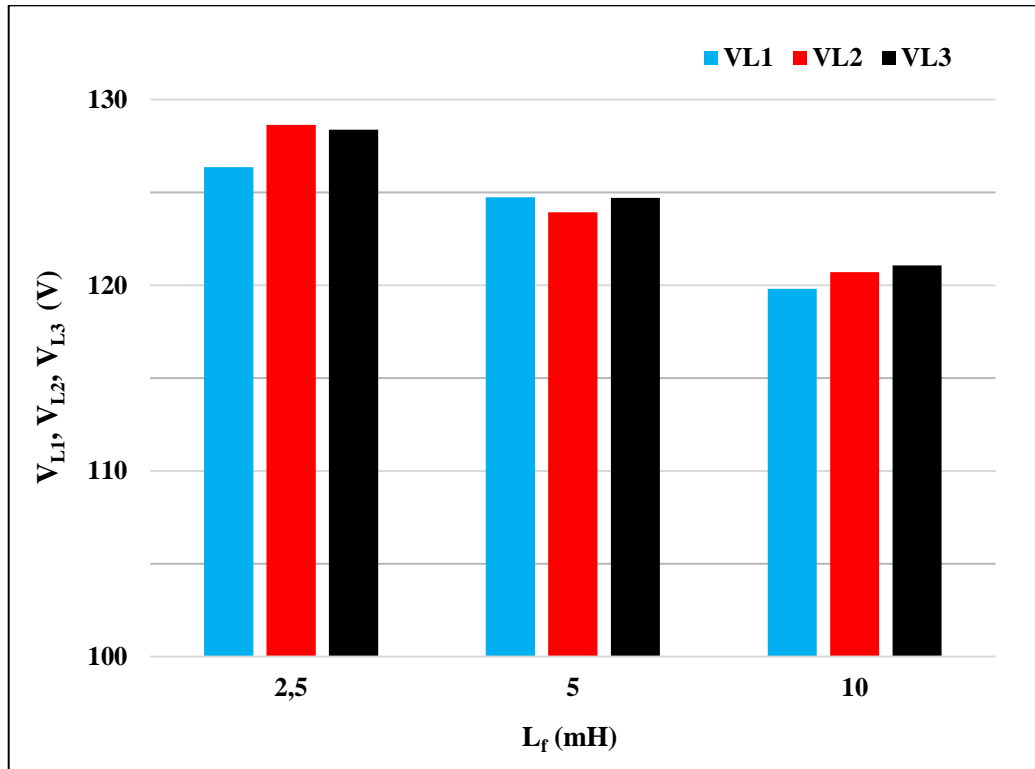
Şekil 4.21: 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 2) için yumuşatma kapasitesi ile GBD oranının değişimi.

6 darbeleri doğrultucu çıkışında kapasite olmadığı durumda gerilimin bağlı dalgalanma yüzdesi %16.94 olarak hesaplanmıştır. C_d 'nin $125\mu\text{F}$, $250\mu\text{F}$, $500\mu\text{F}$, $1000\mu\text{F}$ ve $2000\mu\text{F}$ değerleri için simüle edilen GBD değerleri ise sırasıyla %4.34, %11.87, %14.03, %18.82 ve %34.89'dur. Buradan yumuşatma kapasitesinin değer artışıyla GBD'nin parabolik bir değişim eğilimi gösterdiği ifade edilebilir.

4.3.3 Doğrultucu Devresinin 3. Durumu için Analiz Sonuçları

Bu kısımda, tam yüklenme şartları için 6 darbeleri doğrultucunun a.a. tarafına bağlanan tıkama bobininin PKSG'nin performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir. Analizler Şekil 4.10'da gösterilen analiz sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu sisteminde, d.a. tarafında bulunan yumuşatma kondansatörü, bir önceki bölümde sunulan analizlerde minimum GBD'yi sağlayan $125\mu\text{F}$ değerinde kapasitede seçilmiştir. Tıkama bobininin endüktansı (L_f) ise 2.5, 5 ve 10 mH değerlerinde test edilmiştir.

Şekil 4.22'de 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 3) için tıkama bobinine ait L_f değeri için terminal hat gerilimlerinin etkin değerleri (V_L) sunulmuştur.

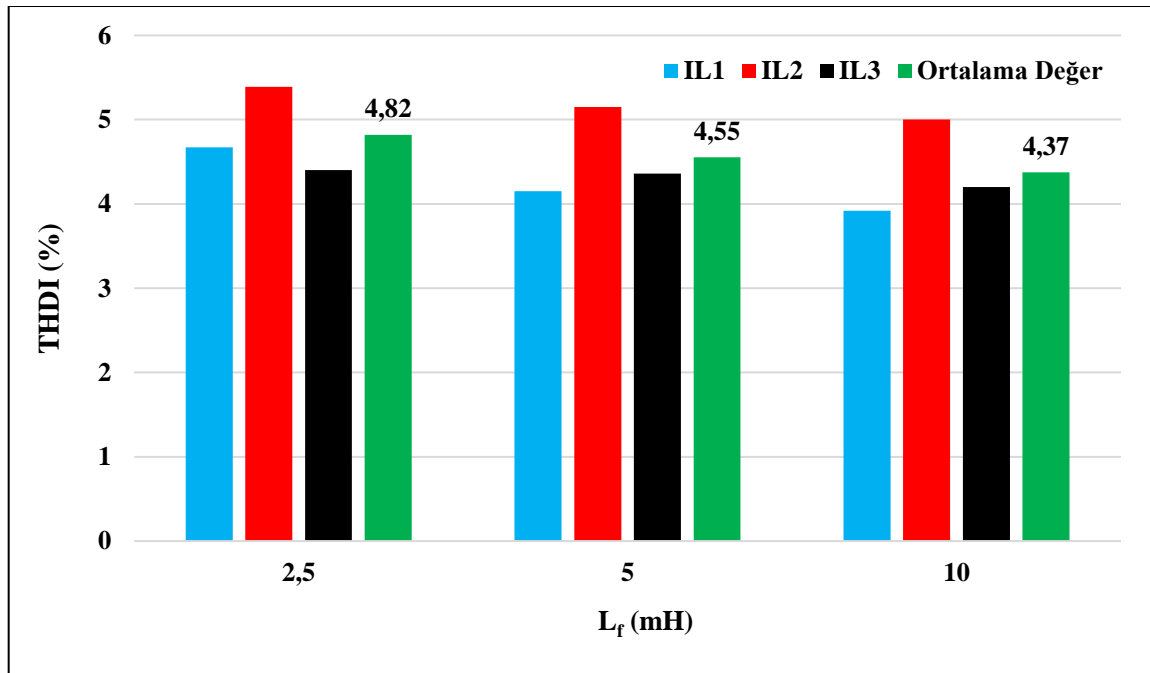


Şekil 4.22: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerleri.

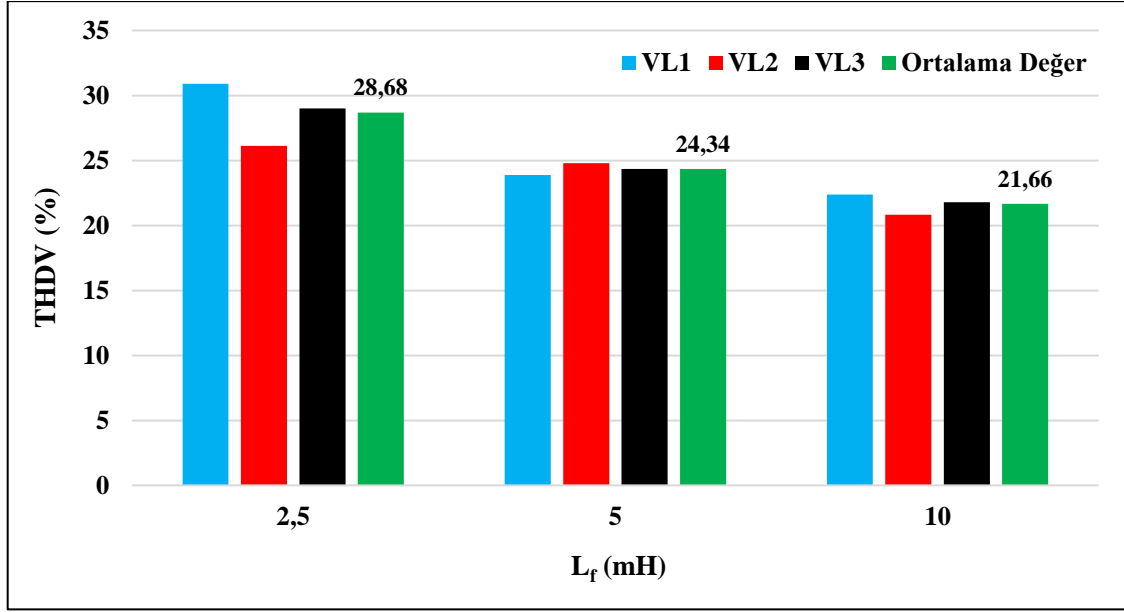
Daha önceki analiz sonuçlarına göre endüktansın olmadığı durum için terminal hat gerilimlerinin ortalama etkin değeri 130.9 V iken, bu şekilden 2.5, 5 ve 10 mH bobin endüktans değerleri için gerilim etkin değerlerinin sırasıyla 128.63 V, 123.83 V ve 120.71 V olduğu görülmektedir. Böylece L_f arttıkça PKSG'nin terminal gerilimlerinin etkin değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, gerilimin düşüşüne bağlı olarak yükün çektiği aktif güç azalarak 10 mH'lik bobin için 1160 W değerini almıştır.

Test edilen bobin endüktans değerleri için PKSG terminalinde ölçülen THDI ve THDV değerleri ise Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de sunulmuştur. Bu şekiller, THDI ve THDV'nin ortalama değerlerinin sırasıyla 2.5 mH için %4.82 ve %28.68, 5 mH için %4.55 ve %24.34, 10 mH için %4.37 ve %21.66 olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, her iki şekilden L_f 'nin artışının THDV ve THDI'yı iyileştirdiği çıktısına ulaşılmaktadır.

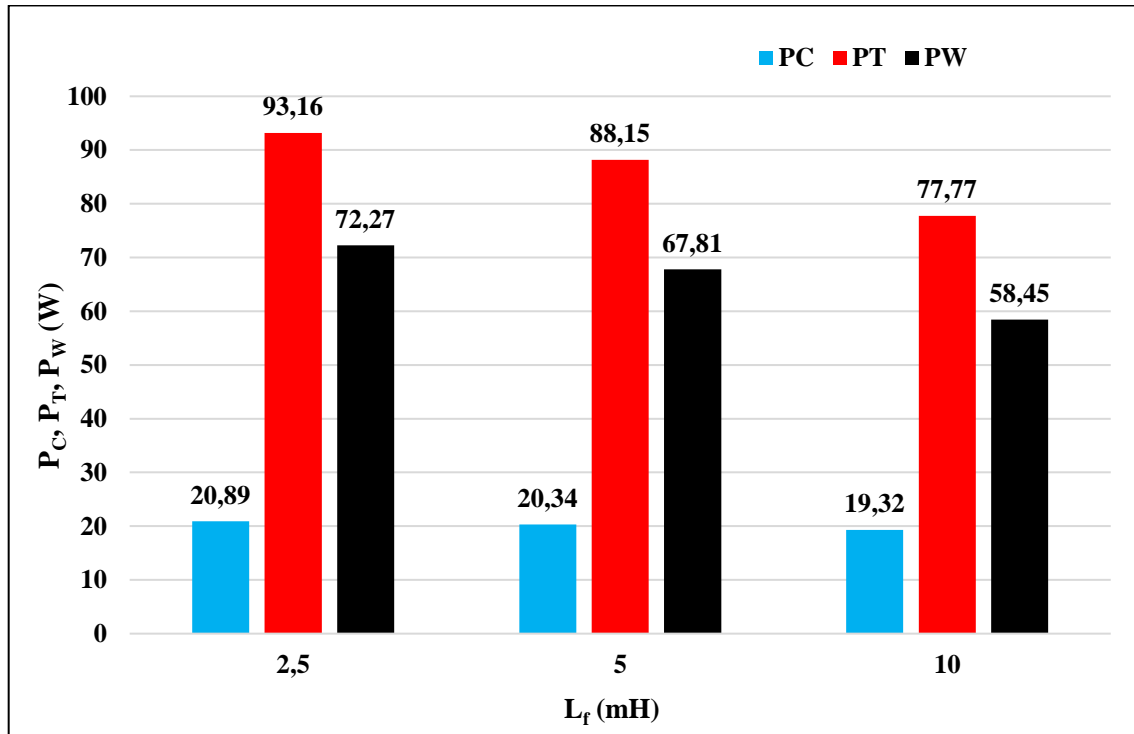
Şekil 4.25'den L_f değerinin 2.5, 5 ve 10 mH olduğu durumlarda, P_T 'nin sırasıyla 93.16, 88.15 ve 77.77 W olduğu ifade edilebilir. Aynı endüktans değerleri için P_C sırasıyla 20.89, 20.34 ve 19.32 W iken, P_W sırasıyla 72.27, 67.81 ve 58.45 W'dır. Ayrıca, 125 μ F yumuşatma kapasiteli devre için tıkama bobininin bağlı olmadığı durumda, P_T , P_C ve P_W kayıpları sırasıyla 99.85, 21.82 ve 78.03 W olduğu dikkate alındığında, endüktans değeri arttıkça, P_C , P_T ve P_W kayıplarının azaldığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.23: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal akımlarının THDI değerleri.



Şekil 4.24: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin terminal gerilimlerinin THDV değerleri.



Şekil 4.25: 6 darbeleri doğrultucu yükün (durum 3) tıkama bobinine ait üç farklı indüktans değeri için PKSG'nin kayıpları.

4.4 Sonuç

Bu bölümde, doğrusal ve doğrusal olmayan yükleme koşullarının PKSG'nin performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir. Doğrusal yük olarak saf omik yük ve doğrusal olmayan yük olarak 6 darbeli kontrolsüz doğrultucuya ait üç farklı devre durumu dikkate alınmıştır. 6 darbeli doğrultucunun birinci durumu; d.a. tarafında sadece saf omik direnç olan ve girişinde herhangi bir harmonik filtreleme elemanı olmayan durumdur. İkincisi; d.a. tarafında saf omik dirence paralel bağlı yumuşatma kondansatörü olan ve girişinde herhangi bir harmonik filtreleme elemanı olmayan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu durumudur. Üçüncüsü ise; d.a. tarafında saf omik dirence paralel bağlı yumuşatma kondansatörü olan ve girişinde yüksek frekanslı akım harmoniklerini tıkayan (süzen) bobinler olan 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu durumudur.

Analizlerde performans parametresi olarak, generatör terminalindeki hat gerilimi etkin değerleri, hat akımı ve hat gerilimi toplam harmonik bozulması değerleri, generatör kayıpları ve moment dalgalanmasının büyüklüğü dikkate alınmıştır. Bu performans parametrelerinin boşa çalışma ve çeşitli yüklenme durumlarındaki değerleri, önceki bölümde sunulan 3B SEY modeli dikkate alınarak benzetim yoluyla hesaplanmıştır. Ayrıca, 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafındaki yumuşatma kondansatörünün kapasite değeri ve a.a. tarafındaki tıkama bobinlerinin endüktans değerinin değişiminin performans parametrelerine etkisi analiz edilmiştir.

Bu parametrik analizlerden;

- Boşa çalışma durumunda generatörün hat gerilimlerinin ortalama THDV değerinin yaklaşık %14 olduğu,
- Doğrusal yük altında ortalama THDV değerinin yüklenmeyle birlikte azalarak tam yüklenme durumu için %3.74 değerine düştüğü, yine doğrusal yük için yüklenme oranıyla hat akımı ortalama THDI değerinin düştüğü ve tam yüklenme için THDV ile yaklaşık aynı değeri aldığı,
- 6 darbeli doğrultucu devresi (durum 1) için generatör yüklenme oranının %25-%100 aralığında ortalama THDI değerinin %22.90'dan %4.97'ye düştüğü, ortalama THDV değerinin ise %19.62'den %28.03'e kadar yükseldiği,
- Yüklenme oranındaki değişimle generatör çıkış gerilimlerinin etkin değerinin önemli derecede düşüş gösterdiği, ancak doğrusal olmayan yüklenme (6 darbeli doğrultucu yükünün 1. durumu) için gerilimin etkin değerinde yüklenme oranıyla düşüşün daha fazla olduğu,

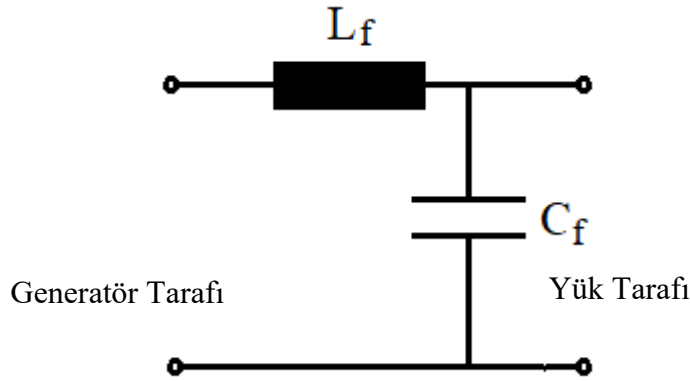
- Aynı aktif güç değeri (yüklenme oranı) için saf omik yük altındaki generatör sargı kayıplarının 6 darbeli doğrultucu yük altındaki sargı kayıplarına kıyasla daha düşük olduğu, ancak çekirdek kayıplarının birbirine yakın olduğu,
 - Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yük için yüklenme oranındaki artışla generatördeki moment dalgalanmasının bağıl değerinin düştüğü, bununla birlikte bağıl moment dalgalanmasının doğrusal yüklenme için doğrusal olmayan yüklenmeye göre daha düşük olduğu,
 - 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafında kondansatör bulunmasının (durum 2) THDV ve THDI üzerinde kötüleştirici bir etki yaptığı, generatör çıkış gerilimlerinin etkin değerinin düşüş gösterdiği, generatör sargı ve toplam kayıplarının dikkate değer derecede arttığı, gerilim düşmesi sebebiyle yükün çektiği aktif gücün de düştüğü,
 - 6 darbeli doğrultucunun a.a. tarafında bobin bulunmasının (durum 3) THDV ve THDI üzerinde iyileştirici bir etki yaptığı, generatör çıkış gerilimlerinin etkin değeri ile generatör sargı ve toplam kayıplarının dikkate değer derecede düştüğü, ancak gerilim düşmesi sebebiyle yükün çektiği aktif gücün de düştüğü,
- çıktılarına ulaşılmıştır.

5. PKSG'NİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜK ALTINDA PASİF FİLTRE KULLANILARAK PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Literatürde tek ayarlı, çift ayarlı, üç ayarlı, bastırılmış tek ayarlı, bastırılmış çift ayarlı, C-tipi ve yüksek geçiren filtreler başta olmak üzere çeşitli paralel pasif filtre tasarımları bilinmektedir [37]. En yaygın kullanılan paralel pasif filtre tipleri ise tek ayarlı ve yüksek geçiren filtrelerdir [61]. Ancak, bu tez çalışmasında ayarlı filtreler yerine düşük geçiren LC pasif filtrelerin kullanımı tercih edilmiştir [61-63]. Bunun sebebi, generatör terminal gerilimi ve yük akımında bulunan geniş bir frekans aralığında çok sayıda harmonik bileşenin tek bir filtre kullanılarak efektif bir şekilde süzülmesinin hedeflenmesidir.

5.1 Düşük Geçiren LC Pasif Filtre Tasarımı

Düşük geçiren LC pasif filtrenin tek faz devresi Şekil 5.1'de verilmiştir [61, 63]. Üç faz üç iletkenli analiz sistemimiz için bu filtre, sistemin ihmal edilebilir dengesizliğe sahip olduğu göz önüne alınarak, Şekil 5.2'de sunulduğu gibi yıldız noktası serbest bırakılmış (topraklanmamış) yıldız bağlı kondansatörler [62] veya üçgen bağlı kondansatörlerle [61] uygulanabilir.



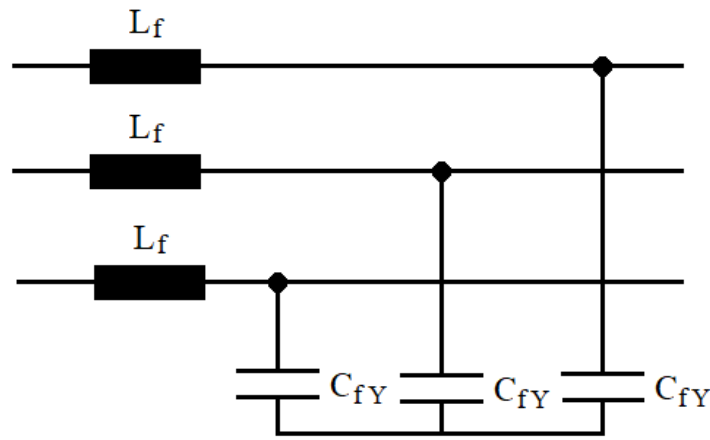
Şekil 5.1: Düşük geçiren LC pasif filtre tek faz devresi.

Düşük geçiren LC filtreler, rezonans (kesim) frekanslarının üstündeki frekanslardaki harmonikleri süzerler. Rezonans frekansının ifadesi tek faz eşdeğer devre için filtre indüktans ve kapasitansı cinsinden Denklem (5.1)'de verildiği gibi yazılabilir [61, 62]:

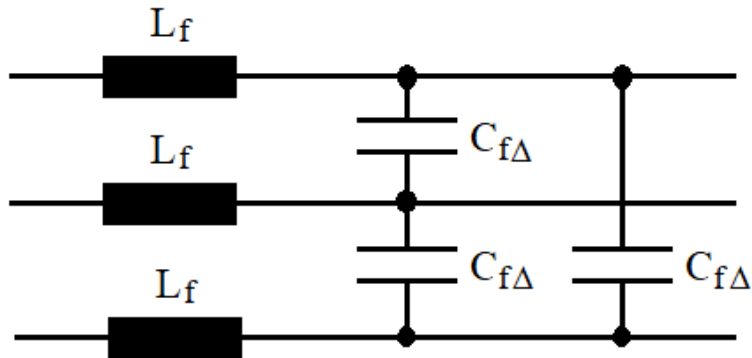
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de sunulan ifade dikkate alınarak, aynı rezonans frekansı (f_r) ve bobin indüktansı (L_f) için üçgen bağlı kondansatör bankalı filtredeki kondansatör kapasiteleri ($C_{f\Delta}$) ile yıldız bağlı kondansatör bankalı filtredeki kondansatör kapasiteleri (C_{fY}) veya tek faz filtre eşdeğer devresindeki kondansatör kapasitansı (C_f) arasındaki ilişki ise yıldız-üçgen dönüşümünden [64] yazılabilir:

$$C_f = C_{fY} = 3C_{f\Delta} \quad (5.2)$$



(a)



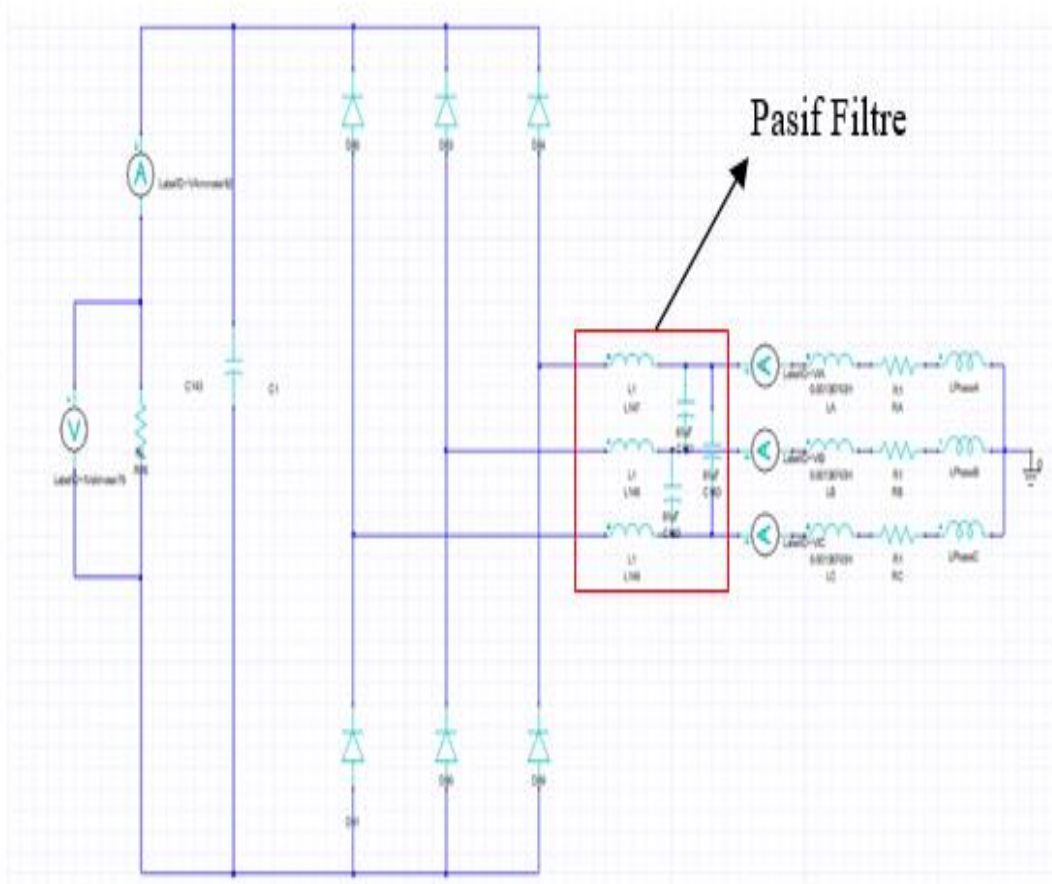
(b)

Şekil 5.2: (a) yıldız bağlı yıldız noktası topraklı olmayan kondansatör bankalı ve (b) üçgen bağlı kondansatör bankalı üç fazlı düşük geçiren LC filtreler.

5.2 Test Sistemi

Buraya kadar tanıtılan düşük geçiren LC pasif filtrenin PKSG'nin 6 darbeleri kontrolsüz doğrultucu yükü altında performansının iyileştirilmesi için tasarımı ve analizi Şekil 5.3'deki test sistemi kurularak gerçekleştirilmiştir.

Sistemde, doğrultucu çıkışında kapasitenin $125\mu\text{F}$ değerinde ve PKSG'nin doğrusal olmayan yaklaşık olarak tam yükleme durumunda tasarım ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bobin ve kondansatör bileşenlerinden oluşan pasif filtre doğrusal olmayan yük ile generatör arasına bağlanmıştır.



Şekil 5.3: PKSG'nin anma gücünde 6 darbeleri doğrultucu yük (durum 2) altında performansının iyileştirilmesi için tasarlanan pasif filtre devresini içeren sistem.

Pasif filtre parametreleri belirlenirken, bir önceki bölümde 6 darbeleri doğrultucunun 3. durumuna ilişkin analizlerde generatör terminal gerilimlerine ait THDV değerini önemli derecede azaltan 5mH ve 10mH tıkama bobini indükstansları filtre indükstansı (L_f) olarak tercih

edilmiştir. Her iki L_f değeri için rezonans frekansı (f_r) yaklaşık 145 Hz ve 203 Hz olan iki farklı tasarım, toplamda ise dört farklı tasarım yapılmıştır. Böylece test sistemindeki en düşük baskın harmonik numarası olan 5. harmonik ve üstündeki harmonikleri süzecek filtre tasarımlarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

5.3 Analiz Sonuçları

Bir önceki kısımda belirtilenlere göre elde edilen filtre tasarımları ve bu filtreler devreye bağlandığında hesaplanan PKSG performans parametreleri filtresiz durumla karşılaştırmalı olarak Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1’den filtresiz durumdaki generatör terminal gerilimleri ve akımlarının ortalama THDV ve THDI değerlerinin %27.86 ile %4.99 olduğu görülmektedir. Aynı tablo, ortalama THDV ve THDI değerlerinin, 1, 2, 3 ve 4 numaralı filtre tasarımlarının kullanımıyla sırasıyla %7.44 - %3.62, %15.24 - %4.30, %9.46 - %4.12 ve %22.53 - %5.22 olduğunu göstermektedir. Ayrıca, generatör terminal gerilimlerinin ortalama etkin değeri filtresiz durum için 131.46 V iken tasarım 1, 2, 3 ve 4 filtrelerinin sisteme bağlandığı durumlar için sırasıyla 152.56, 135.52, 137.45 ve 126.98 V’dir. Bu performans parametreleri dikkate alınarak genel bir değerlendirme yapıldığında son filtre tasarımı (tasarım 4) haricindeki tasarımların harmonik bozulmayı düşürme ve gerilim seviyesini iyileştirme amaçlarına ulaştığı ifade edilebilir.

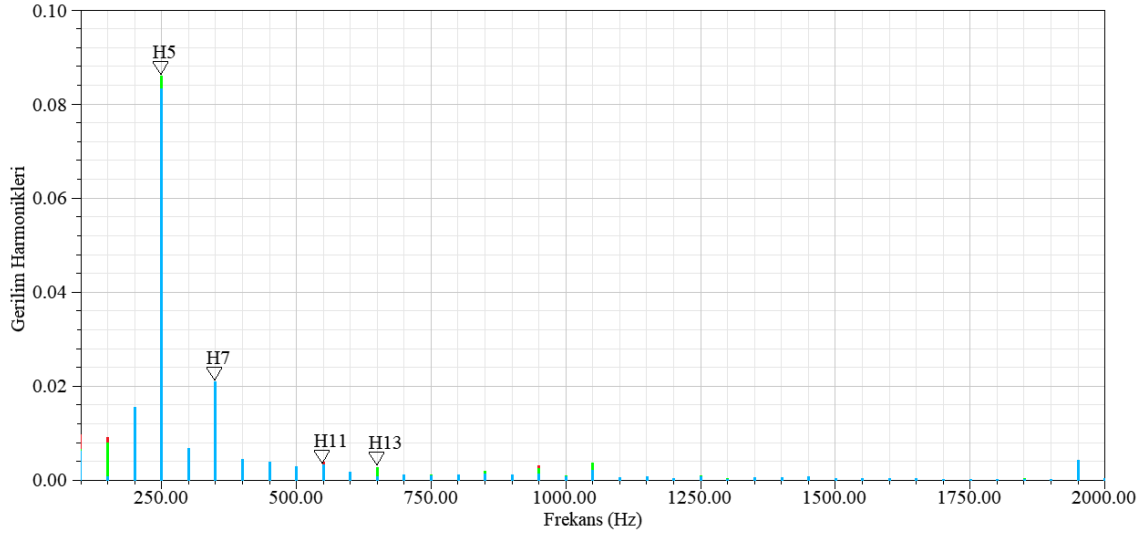
Ancak, tasarımlar arasında erişilen PKSG yüklenme miktarları ve toplam kayıpları bakımından bir değerlendirme yapıldığında, 1500 W gücüne en yakın yüklenme ve en küçük toplam kayıp değerine ulaşan filtrenin 3 numaralı tasarım olduğu sonucuna varılmaktadır. Filtresiz durumda PKSG 1531 W gücünü üretirken 99.85 W toplam kaybına sahiptir. Tasarım 3 filtresi sisteme bağlandığında ise PKSG 1505.72 W gücünde yüklenmiş ve filtresiz durumdakine kıyasla yaklaşık %14 daha az kayba sahip olmuştur. Tasarım 3 sargı ve çekirdek kayıplarında yaklaşık %17 ve %3 oranlarında iyileşmeye yol açmıştır. Bununla birlikte, aynı tasarım 6 darbeli doğrultucu yük altındaki PKSG’nin moment bağıl dalgalanma miktarını (MBD) %21.89’dan %11.09’a düşürmüştür. Böylece, PKSG’nin doğrusal saf omik yük için tam yüklenme durumundaki MBD değeri olan %9.26’ya yaklaşmıştır.

3 numaralı filtre (Tasarım 3) sisteme bağlandığında elde edilen terminal hat gerilimi ve terminal akımlarının harmonik spektrumlarına ait Ansys Maxwell ekranları Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu şekil, filtresiz durumdaki harmonik spektrumları gösteren Şekil 4.11 ile karşılaştırıldığında tasarım 3’ün terminal gerilimleri ve terminal akımlarının harmonik bozulmasını önemli oranda azalttığı söylenebilir.

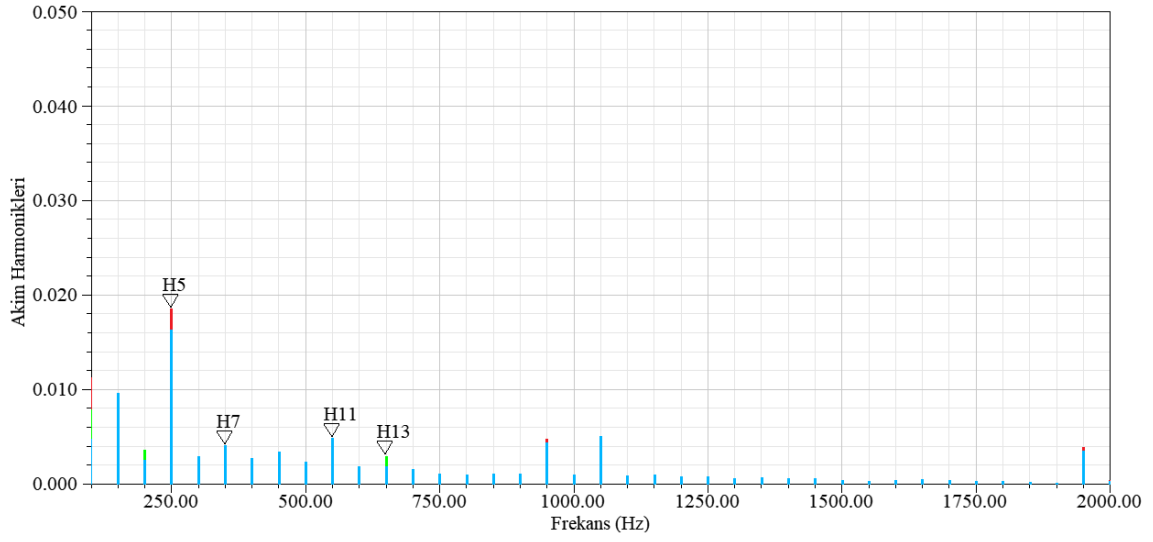
Tablo 5.1: PKSG'nin fitesiz ve filtreli durumları için performans parametre değerleri.

Pasif Filtrenin Bobin İndüktansı ve Rezonans Frekansı	<u>Tasarım-1</u>	<u>Tasarım-2</u>	<u>Tasarım-3</u>	<u>Tasarım-4</u>	Pasif Filtre yok	
	$L_f=5$ mH $f_r=145$ Hz	$L_f=5$ mH $f_r=203$ Hz	$L_f=10$ mH $f_r=145$ Hz	$L_f=10$ mH $f_r=203$ Hz		
PKSG Çıkış Gücü (W)	2283.42	1774.23	1505.72	1305.62	1534	
Yükleme Oranı (%)	149.15	115.89	98.35	85.28	102.26	
V_L (V)	L1	152.59	135.54	136.71	126.27	130.92
	L2	152.16	135.09	137.50	127.08	130.90
	L3	152.95	135.94	138.13	127.59	132.56
	Ortalama Değer	152.56	135.52	137.45	126.98	131.46
THDV (%)	L1	7.44	14.98	9.47	22.31	29.02
	L2	7.83	15.41	9.68	22.67	27.60
	L3	7.06	15.33	9.23	22.6	26.97
	Ortalama Değer	7.44	15.24	9.46	22.53	27.86
THDI (%)	L1	3.36	4.05	3.9	5.01	4.58
	L2	4.27	4.86	4.64	5.73	5.93
	L3	3.23	3.99	3.82	4.93	4.45
	Ortalama Değer	3.62	4.30	4.12	5.22	4.99
MBD (%)	12.63	17.09	11.09	25.79	21.23	
Kayıplar (W)	P _w	130.99	92.9	64.81	62.65	78.40
	P _c	26.56	23.18	21.13	20.18	21.73
	P _T	157.55	116.08	85.94	82.83	100.13

Son olarak, 50-1000 Hz frekans aralığı için tasarım 3 filtresinin tek faz eşdeğer devresinde yer alan bobin ve kondansatörün reaktanslarının değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir. Buradan filtrenin rezonansa geldiği frekansın (kesim frekansının) yaklaşık 145 Hz olduğu görülmektedir. Bu frekanstan sonra filtrenin tek faz eşdeğer devresinde bulunan bobin ile kondansatörün reaktanslarının oranının önemli ölçüde büyüdüğü ifade edilebilir. Böylece, harmonik numarası büyüdükçe yük akımı harmonikleri büyük ölçüde kondansatörler üzerinden yolunu tamamlayarak generatör tarafına geçmeyecek şekilde süzölmüştür. Ayrıca, 145 Hz sonrası frekanslar (özellikle yüksek frekanslar) için kondansatörlerin uçlarındaki gerilimlerin çok küçük değerde olması sebebiyle yük geriliminin yüksek frekanslı harmonikleri süzölmüştür.

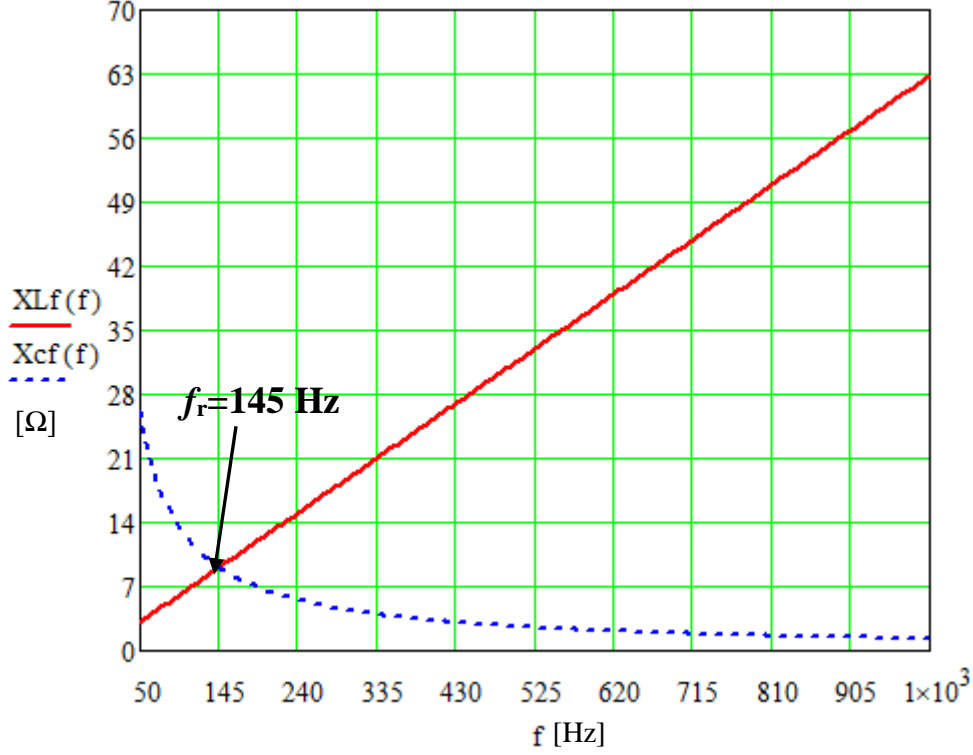


(a)



(b)

Şekil 5.4: 3 numaralı filtre tasarımı için (a) terminal hat gerilimlerinin ve (b) terminal akımlarının harmonik spektrumları.



Şekil 5.5: 50-1000 Hz frekans aralığı için tasarım 3 filtresinin tek faz eşdeğer devresinde yer alan bobin ve kondansatörün reaktanslarının değişimi.

5.4 Sonuç

Bu bölümde, düşük geçiren LC pasif harmonik filtrenin, PKSG'nin 6 darbeleri doğrultucu yükü altında tam yüklendiği şartlar için çıkış gerilimi etkin değeri, THDV, THDI, kayıpları ve moment dalgalanması üzerindeki iyileştirici etkileri analiz edilmiştir.

Analizlerde, iki farklı bobin indüktans değeri için filtre kesim frekansı yaklaşık 145 Hz ve 203 Hz frekanslara ayarlanacak şekilde kondansatör kapasite değerleri belirlenmiştir. Böylece 4 farklı filtre durumu ile filtresiz durum karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarından, pasif harmonik filtrenin, hat gerilimlerine ait ortalama THDV değerini %28'den %7.44'a kadar düşürebildiği, hat akımlarına ait ortalama THDI değerini ise %4.97'den %3.62'ye kadar düşürebildiği görülmektedir. Bununla birlikte, simüle edilen dört tasarımdan birinin (tasarım 4'ün) THDV'yi düşürürken THDI'da artışa sebep olduğu ifade edilmelidir.

Ancak, tasarımlardan sadece biri (Tasarım 3) istenen harmonikleri iyileştirirken anma gerilim ve anma yüklenme koşullarına yakın sonuçlara ulaşmıştır. Bu filtre tasarımı sisteme

bağlandığında erişilen ortalama THDV ve THDI değerleri %9.46 ve %4.12 olup sargı, çekirdek ve toplam kayıplar %17, %3 ve %14 oranında iyileşmiştir. 3 numaralı filtre tasarımı kullanımıyla bağıl moment dalgalanma miktarı da %21.23'den %11.09'a düşürülmüştür.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, düşük maliyet, yüksek devirlerde çalışmaya uygun sağlam rotor tasarımı ve üretim kolaylığı avantajları sebebiyle içten yanmalı motorlu kara taşıtlarında yaygın olarak kullanılan ve literatürdeki çalışmalarda küçük güçlü doğrudan sürürlü rüzgar türbinlerinde de tercih edilen pençe kutuplu senkron generatörlerin (PKSG'lerin) doğrusal olmayan yüklenme altında,

- Modellenmesi,
- Performans analizi,
- Ve performansının düşük geçiren LC pasif filtre kullanarak iyileştirilmesi,

çalışılmıştır.

Buna göre ilk olarak, ülkemizde ve Dünya'daki lisans seviyesinde elektrik makineleri derslerinde yer almayan ve özel bir elektrik makinası olan pençe kutuplu senkron makinenin yapısı, avantaj-dezavantajları ve çalışma prensibi detaylı bir şekilde sunulmuştur.

İkinci olarak, tez kapsamında yapılan simülasyon temelli analizlerde dikkate alınan 1.5 kVA, 150 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG'nin 3B SEY modeli sunulmuştur. Dikkate alınan model Ansys Maxwell'in kütüphanesinde yer alan 0.55 kVA, 115 V ve 50 Hz anma değerlerine sahip 3 fazlı 4 kutuplu kalıcı mıknatıslı PKSG boyutları revize edilerek türetilmiştir.

Üçüncü olarak, boşa çalışma, doğrusal (üçgen bağlı-dengeli saf omik) ve doğrusal olmayan (kontROLSÜZ 6 darbeli doğrultucu) yükler için kalıcı mıknatıslı PKSG'nin hat gerilimi etkin değerleri ve THDV'leri, hat akımı THDI'ları, kayıpları ve moment dalgalanma büyüklüğü performans parametreleri analiz edilmiştir. Doğrusal yük için yapılan analizlerde, %25, %50, %75 ve %100 yüklenme oranları için performans parametreleri değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, 6 darbeli doğrultucu için d.a. tarafında sadece omik direnç olduğu durum (durum 1) ve omik direnç ile kondansatör bağlı olduğu durum (durum 2) incelenmiştir. Bu iki durumda, 6 darbeli doğrultucunun girişinde (a.a. tarafında) yüksek frekanslı harmonikleri süzen tıkama bobini kullanılmamıştır. Bu iki duruma ilaveten, 6 darbeli doğrultucunun üçüncü bir durumu olarak durum 2'deki devrenin girişine tıkama bobini yerleştirilmiştir. İlk doğrultucu devresinde %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumları için simülasyon yapılırken, ikinci devrede yük direnci sabit tutulmuş ve çeşitli kapasite değerleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Üçüncü doğrultucu devresinde ise d.a. tarafındaki direnç ve kondansatör değerleri sabit

tutulmuş ve doğrultucu girişindeki bobinin endüktans değeri değiştirilerek parametrik analizler yapılmıştır.

Bu parametrik analizlerden;

- Boşta çalışma durumunda generatörün hat gerilimlerinin ortalama THDV değerinin yaklaşık %14 olduğu,
- Doğrusal yük altında ortalama THDV değerinin yüklenmeyle birlikte azalarak tam yüklenme durumu için %3.74 değerine düştüğü, yine doğrusal yük için yüklenme oranıyla hat akımı ortalama THDI değerinin düştüğü ve tam yüklenme için THDV ile yaklaşık aynı değeri aldığı,
- 6 darbeli doğrultucu devresi (durum 1) için generatör yüklenme oranının %25-%100 aralığında ortalama THDI değerinin %22.90'dan %4.97'ye düştüğü, ortalama THDV değerinin ise %19.62'den %28.03'e kadar yükseldiği,
- Yüklenme oranındaki değişimle generatör çıkış gerilimlerinin etkin değerinin önemli derecede düşüş gösterdiği, ancak doğrusal olmayan yüklenme (6 darbeli doğrultucu yükünün 1. durumu) için gerilimin etkin değerinde yüklenme oranıyla düşüşün daha fazla olduğu,
- Aynı aktif güç değeri (yüklenme oranı) için saf omik yük altındaki generatör sargı kayıplarının 6 darbeli doğrultucu yük altındaki sargı kayıplarına kıyasla daha düşük olduğu, ancak çekirdek kayıplarının birbirine yakın olduğu,
- Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yük için yüklenme oranındaki artışla generatördeki moment dalgalanmasının bağıl değerinin düştüğü, bununla birlikte bağıl moment dalgalanmasının doğrusal yüklenme için doğrusal olmayan yüklenmeye göre daha düşük olduğu,
- 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafında kondansatör bulunmasının (durum 2) THDV ve THDI üzerinde kötüleştirici bir etki yaptığı, generatör çıkış gerilimlerinin etkin değerinin düşüş gösterdiği, generatör sargı ve toplam kayıplarının dikkate değer derecede arttığı, gerilim düşmesi sebebiyle yükün çektiği aktif gücün de düştüğü,
- 6 darbeli doğrultucunun a.a. tarafında bobin bulunmasının (durum 3) THDV ve THDI üzerinde iyileştirici bir etki yaptığı, generatör çıkış gerilimlerinin etkin değeri ile generatör sargı ve toplam kayıplarının dikkate değer derecede düştüğü, ancak gerilim düşmesi sebebiyle yükün çektiği aktif gücün de düştüğü,

çıktılarına ulaşılmıştır.

Son olarak, düşük geçiren LC pasif harmonik filtrenin PKSG'nin 6 darbeli doğrultucu yükü altında tam yüklendiği şartlar için çıkış gerilimi etkin değeri, THDV, THDI, kayıp ve moment dalgalanması üzerindeki iyileştirici etkileri analiz edilmiştir. Sistemin, tasarlanan 4 farklı filtre durumu ile filtresiz durumda karşılaştırmalı olarak analizi neticesinde,

- Hat gerilimlerine ait ortalama THDV değerini %27.86'dan %9.46'ya düşüren ve hat akımlarına ait ortalama THDI değerini ise %4.99'dan %4.12'ye kadar düşüren,
- Sargı, çekirdek ve toplam kayıplar %17, %3 ve %14 oranında iyileştiren,
- Bağlı moment dalgalanma miktarı da %21.23'den %11.09'a düşüren,

filtre en iyi filtre tasarımı olarak değerlendirilmiştir. Diğer tasarımların, genel olarak harmonik bozulmayı iyileştirmekle birlikte anma gerilim ve anma yüklenme değerlerine uymayan sonuçlar verdikleri görülmüştür.

Bu tez çalışmasının devamında, sargılı uyarımlı ve melez uyarımlı PKSG'ler için benzer performans analizleri yapılabilir. Ayrıca, sargılı, kalıcı mıknatıslı ve melez uyarımlı PKSG'lerin doğrusal olmayan yüklenme altında performans iyileştirmesi için çeşitli pasif harmonik filtre tipleri uygulanabilir.

7. KAYNAKÇA

- [1] M. G. Unutulmaz, “Modeling of charging system and control of an alternator of a vehicle”, *Msc. Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering and Technology*, Istanbul, Turkey, 2013.
- [2] B. Lequesne, “Automotive electrification: The nonhybrid story”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 40-53, 2015.
- [3] D. M. Whaley, W. L. Soong, and N. Ertugrul, “Extracting more power from the Lundell car alternator”, *Australian Univ. Power Eng. Conf.*, Brisbane, Australia, 2004, pp. 26-29.
- [4] O. Roua, et al. “3D-FEA based-comparison of different topologies of claw-pole alternators with a dual excitation”, *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, Monaco, 2018, pp. 1-6.
- [5] J. S. Artal-Sevil, et al., “Development of a small wind turbine for stand-alone system in rural environment. Reuse and recycling of electric motors”, *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, vol. 1, no. 16, pp. 745-750, 2018.
- [6] S. P. Phyo, and T. H. Aung, “Wind turbine generation system implemented with a claw pole alternator”, *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, vol. 3, no. 16, pp. 3411-3416, 2014.
- [7] Y. Cao, S. Zhu, J. Yu, C. Liu, “Optimization design and performance evaluation of a hybrid excitation claw pole machine”, *Processes*, vol. 10, no. 3, pp. 541, 2022.
- [8] X. H. Bao, and M. Z. Liu, “Parameter analysis and optimal design for mobile Claw-pole alternator”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 130, pp. 658-661, 2012.
- [9] Z. Zhang, H. Liu, T. Song, “Optimization design and performance analysis of a PM brushless rotor claw pole motor with FEM”, *Machines*, vol. 4, no. 3, pp. 15, 2016.
- [10] Z. Shuguang, et al. “Rotor shape optimization of claw-pole alternator to reduce acoustic noise caused by electromagnetic forces”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 4, pp. 2118-2125, 2019.
- [11] H. Geng, et al. “Development of brushless claw Pole electrical excitation and combined permanent magnet hybrid excitation generator for vehicles”, *Energies*, vol. 13, no. 18, pp. 4723, 2020.
- [12] B. Li, et al. “Analysis and cogging torque minimization of a novel flux reversal claw pole machine with soft magnetic composite cores”, vol. 15, no. 4, pp. 1285, 2022.

- [13] X. Zhao, S. Niu and T. W. Ching, "Design and analysis of a new brushless electrically excited claw-pole generator for hybrid electric vehicle", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, 2018.
- [14] D. Hagstedt, et al. "Design and experimental evaluation of a compact hybrid excitation claw-pole rotor", *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, Marseille, France, 2012, pp. 2896-2901.
- [15] S. Wu, and S. Zuo, "Characteristics analysis of electromagnetic force and noise of claw pole alternators with different pole and slot combinations and phase number", *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 9, pp. 1357-1364, 2018.
- [16] F. Yang, X. Bao, C. Di and Z. Chen, "Simulation and experiment on reducing electromagnetic vibration and noise of claw-pole alternators", *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, 2015, pp. 1452-1458.
- [17] A. Tan-Kim, et al. "Influence of the manufacturing process of a claw-pole alternator on its stator shape and acoustic noise", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no.5 pp. 4389-4395, 2017.
- [18] A. Tan-Kim, V. Lanfranchi, J. Legranger, F. Palleschi and M. Redon, "Influence of temperature on the vibro-acoustic behavior of claw-pole alternators", *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 2014, pp. 1628-1634.
- [19] F. Jurca, C. Martis and K. Biro, "Comparative analysis of the claw-pole rotor dimensions influence on the performances of a claw -pole generator for wind applications", *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, 2009, pp. 715-720.
- [20] F. Jurca, C. Martis, I. Birou and K. Biro, "Analysis of permanent magnet claw-pole synchronous machine", *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, 2008, pp. 75-80.
- [21] K. P. P. Pillai, M. K. Idiculla and A. S. Nair, "Frequency spectrum of the generated voltage of claw pole automotive alternators on no load", *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2005, pp. 726-729.
- [22] K. P. P. Pillai, K. I. Mini, and S. N. Achuthsankar, "Spectral study on the voltage waveform of claw pole automotive alternator", *European Council for Modeling and Simulation*, pp. 456-461, 2006.
- [23] R. Omri, A. Ibala and A. Masmoudi, "Characterization on the no- and on-load operations of an improved claw pole machine", *13th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monte Carlo, Monaco, 2018, pp. 1-8.

- [24] C. Ye, X. Liang, F. Xiong, J. Yang, W. Xu and Y. Liu, "Design of an axial-flux PM-assisted claw-pole generator based on an equivalent magnetic circuit model", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 2040-2049, 2018.
- [25] V. E. Wagner et al., "Effects of harmonics on equipment", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, 1993.
- [26] G. K. Singh, "Power system harmonics research: a survey", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, no. 2, pp. 151-172, 2009.
- [27] E. F. Fuchs, and M. A. S. Masoum, *Power quality in power systems and electrical machines*. Burlington, MA, USA: Academic press, 2011.
- [28] E. Arslan, M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, "An analysis into the effect of voltage harmonics on the maximum loading capability of transformers", *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 2014, pp. 616-620.
- [29] E. Arslan, S. Sakar and M. E. Balci, "On the no-load loss of power transformers under voltages with sub-harmonics", *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, 2014, pp. 228-233.
- [30] S. H. E. Abdel Aleem, et al. "Optimal passive filter design for effective utilization of cables and transformers under non-sinusoidal conditions", *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 2014, pp. 626-630.
- [31] M. E. Balci, A. E. Emanuel, "Apparent power definitions: a comparison study", *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 2713-2722, 2011.
- [32] M. E. Balci, et al. "An algorithm for optimal sizing of the capacitor banks under nonsinusoidal and unbalanced conditions", *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, vol. 7, no. 2, pp.116-122, 2014.
- [33] M. E. Balci and M. H. Hocaoglu. "Effects of source voltage harmonics on power factor compensation in ac chopper circuits", *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 53-60, 2008.
- [34] A. Mansoor, et al. "Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no.3, pp.1416-1422, 1995.
- [35] L. Motta and N. Faúndes, "Active/passive harmonic filters: Applications, challenges & trends", *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 657-662.

- [36] F. Z. Peng, and D. J. Adams, "Harmonic sources and filtering approaches-series/parallel, active/passive, and their combined power filters", *the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*, Phoenix, AZ, USA, 1999, pp. 448-455.
- [37] A. Karadeniz and M. E. Balci, "Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions", *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 324-334, 2018.
- [38] M. E. Balci, "Optimal C-type filter design to maximize transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions", *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 14, pp. 1565-1575, 2014.
- [39] T. Drabek, "Derating of squirrel-cage induction motor due to rotating harmonics in power voltage supply¹", *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 735, 2023.
- [40] N. A. Othman, and H. F. Ameen, "The influence of non-sinusoidal voltage sources on the steady state performance of different NEMA designs of IMs", *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 34, no. 6, pp.8-19, 2022.
- [41] T. Akdoğan, "Ağır ticari araçlarda alternatör ve batarya yönetim sisteminin matematiksel modellenmesi ve enerji verimliliğine katkılar", İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2019.
- [42] F. Kutt, M. Michna, G. Kostro and M. Ronkowski, "Comparative analysis of salient and non-salient pole brushless synchronous generator for application in autonomous electric power system", *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, 2013, pp. 2680-2684.
- [43] G. Dajaku, B. Lehner, X. Dajaku, A. Pretzer and D. Gerling, "Hybrid excited claw pole rotor for high power density automotive alternators", *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 2536-2543.
- [44] I. Boldea, L. N. Tutelea, and A. A. Popa, "Claw pole synchronous motors/generators (CP-SMs/Gs) design and control: Recent progress", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 4556-4564, 2021.
- [45] B. Zhang et al., "Comparison of 3-, 5-, and 6-phase machines for automotive charging applications", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2003 (IEMDC'03)*, Madison, WI, USA, 2003, pp. 1357-1362.
- [46] M. G. Unutulmaz and L. T. Ergene, "Excitation current control of a claw pole automotive alternator", *IEEE 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 1-6.

- [47] F. N. Jurca and C. Martis, “Theoretical and experimental analysis of a three-phase permanent magnet claw-pole synchronous generator”, *IET Electric Power Applications*, vol. 6, no. 8, pp. 491-503, 2012.
- [48] D. Zhang, C. Zhao, L. Zhu, Y. Ding, C. Yu and C. Tian, “On hybrid excitation claw-pole synchronous generator with magnetic circuit series connection”, *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 2008, pp. 3509-3513.
- [49] P. Upadhyay, A. Kedous-Lebouc, L. Garbuio, J.C. Mipo and J.M. Dubus, “Design & comparison of a conventional and permanent magnet based claw-pole machine for automotive application”, *15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria, 2017, pp. 1-5.
- [50] L. Sainz, J. J. Mesas, and A. Ferrer, “Characterization of non-linear load behavior”, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, pp. 1773-1783, 2008.
- [51] M. E. Balci, et al. “Experimental verification of harmonic load models”, *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padova, Italy, 2008, pp. 1-4.
- [52] A. Karadeniz, O. Ozturk, A. Koksoy, M. B. Atsever, M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, “Accuracy assessment of frequency-domain models for harmonic analysis of residential type photovoltaic-distributed generation units”, *Solar Energy*, vol. 233, pp. 182-195, 2022.
- [53] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, O. Duque-Perez, “A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems”, *Energies*, vol. 14, no.20, pp. 6467, 2021.
- [54] J. C. Das, “Effects of Harmonics”, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2015, pp.331-378.
- [55] M. Rosu, et al., *Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives.*, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [56] Ansys Maxwell Getting Started Module 1: Basics. ANSYS Innovation Courses (2020). [Online] Erişim adresi: www.courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/MAXW_GS_2020R2_EN_LE01.pdf, Erişim tarihi: 12.06.2023.
- [57] L. Gang, et al. “A review of design optimization methods for electrical machines”, *Energies*, vol. 10, no. 12, pp. 1962, 2017.
- [58] K. Kutucu, “Sonlu elemanlar yöntemiyle üç boyutlu elektrik alan analizi”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009.
- [59] B. Stoev, et al. “Finite element analysis of rotating electrical machines—An educational approach”, *2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Athens, Greece, 2017, pp. 262-269.

- [60] M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, "Comparative review of multi-phase apparent power definitions", *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, Bursa, Turkey, 2009, pp. I-144-I-148.
- [61] H. Zubi, "Lowpass broadband harmonic filter design", *Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Graduate School Of Science Engineering and Technology*, Ankara, Turkey, 2005.
- [62] S. Adak, "Harmonics mitigation of stand-alone photovoltaic system using LC passive filter", *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, pp. 2389–2396, 2021.
- [63] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg and C. L. Bak, "A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 54-69, 2016.
- [64] J. Tatum, "Chapter 5: capacitors", <https://www.astro.uvic.ca/~tatum/elmag/em05.pdf>, En son erişim 1.07.2023.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : YUSUF TOPRAK

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ /Elektrik Elektronik Mühendisliği	2018
Lise	Savaştepe Anadolu Öğretmen Lisesi/Sayısal	2013