

YENİ NESİL JET AVCI UÇAKLARINDA ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ TARİHSEL GELİŞİMİ, OPTİMAL GÜÇ SİSTEMİ VE YENİ NESİL ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİNİN KAVRAMSAL GÜÇ DAĞITIM TASARIMINA GÖRE KABLO VE DÖNÜŞÜM BİRİMLERİ AĞIRLIK ANALİZ ve OPTİMİZASYONU

Haydar Yusuf ERDOĞAN¹
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii,
Ankara

Sefa OCAKLI²
Daiichi Elektronik. A.Ş. İstanbul

Serkan ERDEM³ ve Ahmet Engin
YILMAZ⁴
Savronik Elektronik A.Ş., Eskişehir

ÖZET

Beşinci nesil jet avcı uçağı tanımı en kapsamlı ve güçlü aviyonik özelliklere sahip avcı uçağı olarak tanımlanmaktadır. [McHale, 2010] Servis tabanlarının yüksek olması, silahlarının gizlenebilir olması, yüksek performanslı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip, gelişmiş teknolojik altyapıya sahip olmaları ve en önemlisi düşük radar iz düşümü beşinci nesil avcı uçaklarının karakteristik özellikleridir. Günümüzde aktif olarak kullanılan beşinci nesil avcı uçakları Lockheed Martin F-22 Raptor ve F-35 Lightning II, Sukhoi PAK FA, Chengdu J-20 ve Shenyang J-3 aktif olarak kullanılabilecek avcı uçaklarıdır. Türk Silahlı Kuvvetleri ihtiyaçlarını karşılamak üzere başlatılan Milli Muharip Uçak (MMU) Projesi Türk Havacılık Uzay Sanayi tarafından 5. nesil bir jet uçağı sınıfında tasarlanmaktadır. Yeni nesil jet avcı uçakları üzerinde bulunan faydalı yüklerin artışı, yüksek manevra kabiliyetleri, alınan ekstra güvenlik önlemleri, yedeklilik yapıları ve birçok farklı görev tanımı ve görevlerine özel çeşitli tasarımları nedeniyle uçak alt sistemleri her geçen gün Daha Elektrikli Hava Aracı (MEA: More Electric Aircraft) konsepti doğrultusunda evrilmektedir. Uçak teknolojisi zaman içerisinde geliştikçe farklı ihtiyaçları karşılayabilmek için uçak üzerinde üretilen ve kullanılan elektriksel güç değerleri değişkenlik göstermiştir. Günümüzde 5. nesil jet avcı uçaklarında temel elektrik güç kaynağı olarak 270VDC üreteçler kullanılmakta olup gelecek dönem tasarımlarda 540VDC sistemin kullanılacağı öngörülmektedir. Yeni nesil hava araçlarında elektrik üreticinin tipi uçak tasarımını doğrudan etkileyen bir parametredir. Genel güç dağıtım mimarisini doğrudan etkileyecek elektrik sisteminin seçilmesi için bu çalışmada kavramsal güç dağıtım tasarımı üzerinden 270VDC, 230VAC ve 115VAC üreteç olacak şekilde üç farklı güç kaynağı (Starter Generator) seçilerek analiz yapılmaktadır. Analiz sonrasında her üç mimarinin avantaj ve dezavantajları, kullanılacak kabloların ve dönüşüm birimlerinin ağırlık perspektifleri belirlenmektedir.

GİRİŞ

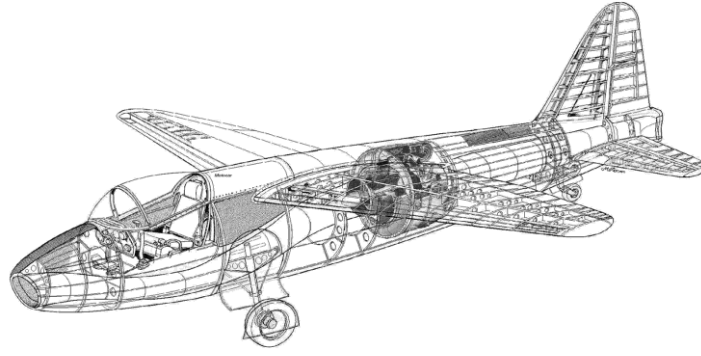
Havacılık sektörünün geldiği noktada tarihte ilk kez motorlu uçakla uçan Wright kardeşler gelişmesi durdurulamaz havacılık sektörünü başlatmış oldular. Zaman içerisinde gelişen sektörde ilk gerçek anlamda jet uçağı 1939 yılında Alman Erich Warsitz tarafında uçurulan Heinkel He 178 Şekil 1'de verilmiştir. [Warsitz, 2009]. Birinci dünya savaşı sırasında gözetleme keşif ve havadan yere taarruz görevlerinin ardından İkinci dünya savaşı sırasında birçok ülke rakiplerine üstünlük sağlamak, önleme ve tahrip amacıyla avcı uçak tasarımları yaptılar. Hava üstünlüğü için silahlandırılan jet uçakları muharebe alanlarında önemli bir hale gelmiş ve modern ordular içinde en büyük güç olmuştur.

¹ Elektrik ve Aviyonik Sistem Müh., E-posta: haydaryusuf.erdogan@tai.com.tr

² Proje Yöneticisi, E-posta: sefa.ocakli@daiichi.com

³ Uzman Tasarım Müh., E-posta: serkan.erdem@savronik.com.tr

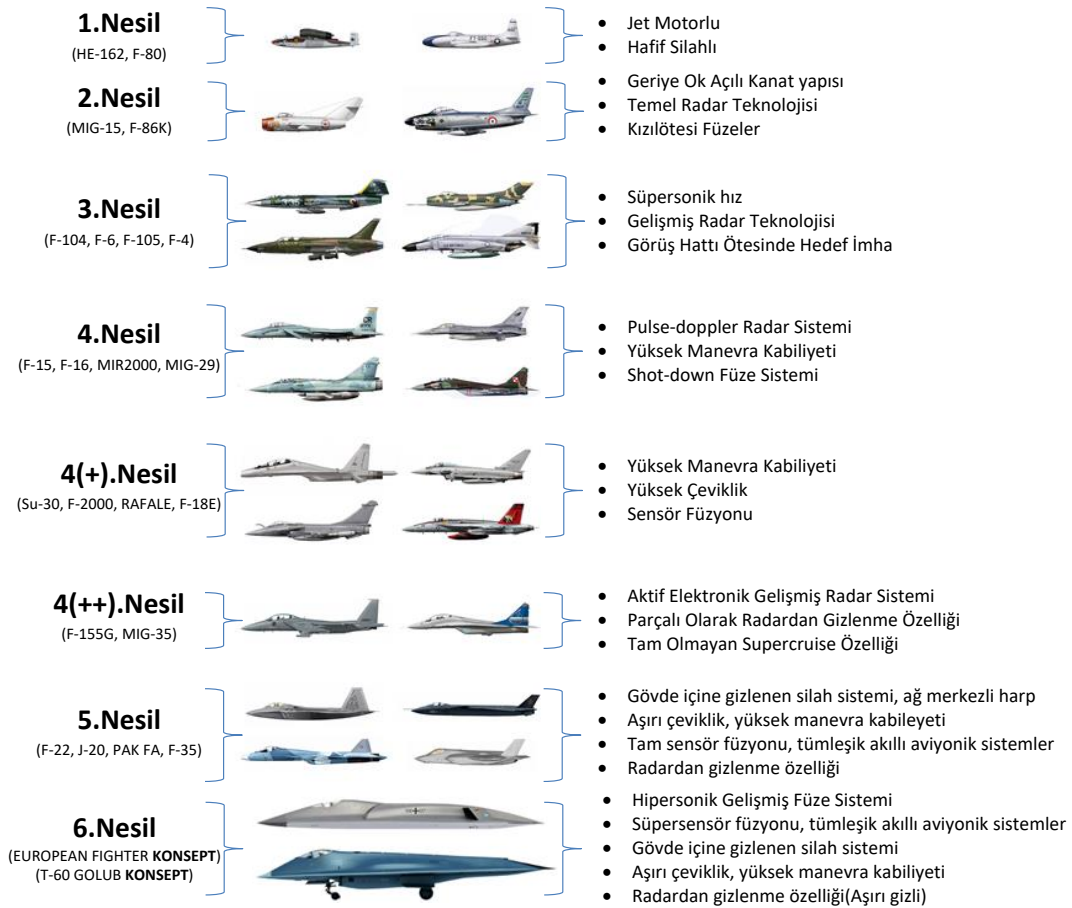
⁴ Grup Müdürü, E-posta: aengin.yilmaz@savronik.com.tr



Şekil 1: Heinkel He 178

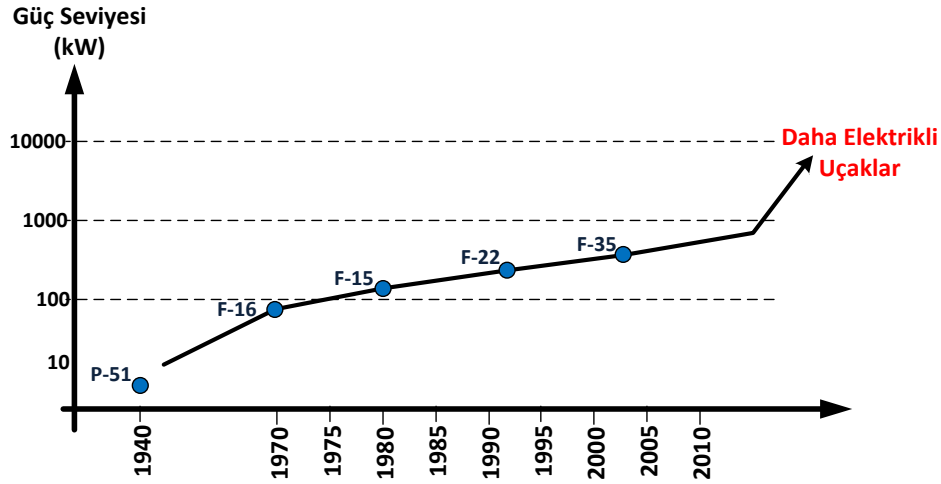
İkinci dünya savaşından sonra soğuk savaş döneminde, havacılık sektörünün sivil anlamda kullanılmaya başlaması, farklı askeri görev tanımlarını ortaya çıkarmış oldu. Jet uçak tasarımında gelişen teknolojiye bağlı olarak soğuk savaş döneminde transatlantik uçuşlar yapılmış, buna bağlı olarak ülkeler istihbarat toplamak için radara yakalanmayan servis tabanı yüksek casus uçak tasarımına yoğunlaşmışlardır. Üreticisinin Amerikan Lockheed firması olduğu SR-71 Blackbird 1964 yılında ilk uçuşunu yapmış, 85.000ft servis tabanı, 3+ mach'tan fazla azami hızı ve radar dalgalarını yansıtmayan tasarımı ile uzun süre casus uçak olarak envanterde kalmıştır[FS-2008-6-030-DFRC].

20. yüzyıl sonlarında radar izi bırakmayan, art yakıcı kullanmadan süpersonik hıza erişme özelliğine sahip, nozzle yönlendirmesiyle yüksek manevra kabiliyetine ve dikey iniş-kalkış yapabilen sahip uçak tasarımları ortaya çıkmıştır. Havacılık sektöründe hızla gelişen teknolojilere bağlı olarak askeri avcı uçakları sınıflandırılmıştır. Jet motorlu uçakların nesil ayrımları, genel özellikleri ve henüz kavramsal tasarım aşamasında bulunan 6.nesil avcı uçaklarına ait öngörüler Şekil 2'de verilmiştir.



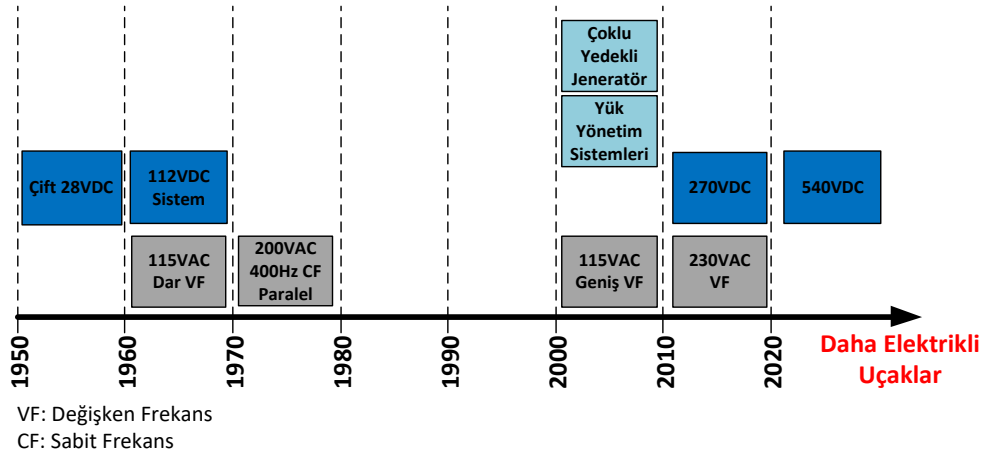
Şekil 2: Avcı Uçakları Nesil Sınıflandırılması

Son yıllarda, uçak performansının optimizasyonu, güvenilirliğinin artırılması ve başlangıç ile işletme maliyetlerinin azaltılması amacıyla, hidrolik, mekanik ve pnömatik güç sistemlerinin yerini elektrik gücünün alması eğilimine girilmiştir.[McHale, 2010] Tüm bu gelişmelere paralel olarak karmaşıklaşan uçak tasarımları temelde daha fazla elektrik ve güç ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Güç sistemlerindeki gelişmelere ek olarak askeri uçakların elektriksel güç ihtiyacı tarihsel gelişimi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3: Askeri Uçakların Elektriksel Güç İhtiyacı Tarihsel Gelişimi

Hava araçlarında elektrik güç sistemi, hava aracı özelinde ve uygulamaya göre farklılıklara sahipken haberleşme, seyir/sefer, gösterge/uyarı/kontrol gibi aviyonik sistemler ile uçuş kontrol, itki, yakıt, hidrolik, ışıklandırma, pnömatik, çevresel kontrol, yangın, oksijen gibi uçak sistemlerine çalışmaları için gereken elektrik gücü sağlamaktadır. Tüm bu zaruri ekipmanların kullanılması hava araçlarında daha çok elektrik enerjisi ihtiyacı doğurmaktadır.[ERDEM, ERDOĞAN, OCAKLI, YILMAZ, 2018] Şekil 4’te Uçak üzeri elektriksel güç sistemlerinin kullanımının tarihsel gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 4: Uçak Üzeri Elektriksel Güç Tarihsel Gelişimi

YÖNTEM

Yeni Nesil Jet Avcı Uçaklarında Elektrik Güç Sistemi

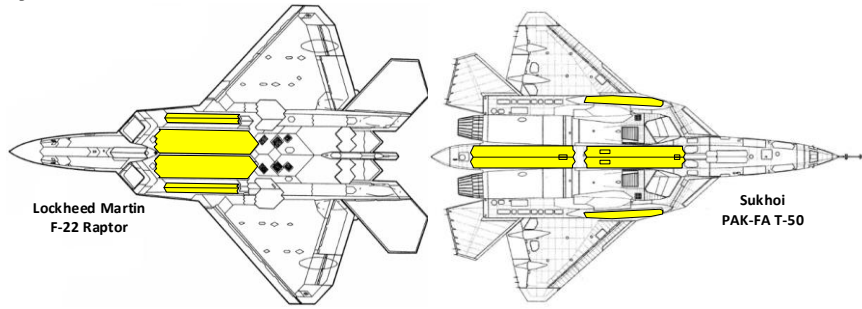
Yeni nesil jet avcı uçakları elektrik güç üretim ve dağıtım sistemi temel olarak 270VDC sistemdir. Hava araçları elektrik güç karakteristiğinin tanımlandığı askeri standart MIL -STD-704'tür. İlgili askeri standartta 270VDC sistem ilk olarak B versiyonu ile 17 Kasım 1975'de yayınlanmıştır, ancak 270VDC sistem prototip aşamasında fonksiyonel olarak kullanılması 2000'li yılların başıdır. 270VDC sistem gereksinimleri son olarak 2004'te güncellenmesine rağmen (MIL -STD-704F) yeni nesil jet uçakları için gerekli tüm spesifikasyonları içermemektedir. MIL -STD-704 standardının ilerleyen süreçte 270VDC sistem ile ilgili olarak daha fazla detaylandırılacağı ve 540VDC sistemin standarda gireceği öngörülmektedir. 270VDC daha elektrikli uçak projesi ekipman ve sistem

entegrasyonu seviyesinde yüksek güçlü doğru akım teknolojisini artırmak için 2003 yılında Almanya Federal Savunma teknoloji ve Satın Alma bürosu tarafından başlatılmıştır. [Mentjes,]

Yüksek Voltaj DC Sistem Kullanım Alanları ve Faydaları: Havacılık sektöründe tasarımları olgunlaşan beşinci nesil jet uçaklarında 270VDC elektrik üretim ve dağıtım yapılmaktadır. Kullanılan yüksek voltaj daha çok elektromekanik çalıştırma, çevre ve yakıt sistemlerinde kullanılmaktadır.

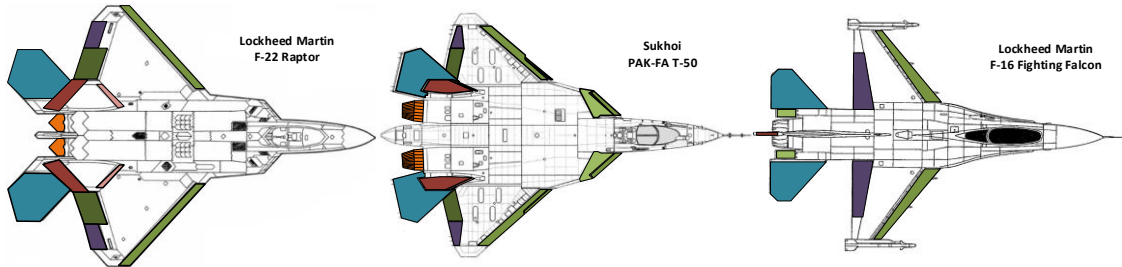
Yeni nesil askeri jet uçaklarında yüksek voltaj DC (270VDC) sistemlerin kullanılmasının faydaları aşağıda verilmiştir.

- Platform bazında artan faydalı yük ihtiyaçlarına bağlı olarak uçak ağırlığının optimizasyonu kapsamında hava aracı üzerinde uzak mesafelere ince kablolar ile yüksek voltaj altında akım taşınması güvenli şekilde yapılabilmektedir.
- Yüksek gerilim ile iletim sırasında elektrik güç sisteminde kullanılan kablo kesitleri düşük olmaktadır.
- Beşinci nesil jet uçaklarının en önemli özelliklerinden biri olan düşük görünürlük özelliği için gövde içerisinde taşınan silah sistemleri, elektrik tahrikli aktüatörlerin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. F-22 Raptor'da kullanılan gövde içerisinde taşınan silah yuvaları Şekil 5'te gösterilmiştir.



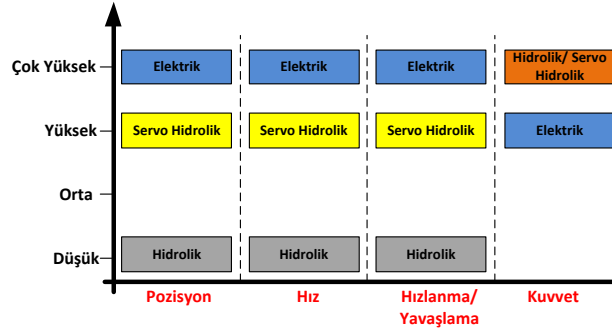
Şekil 5: T-50 ve F-22 Raptor Gövde İçi Silah Yuvaları

- 4(+). Nesil uçaklara kadar uçuş kontrol yüzeylerin hareketi için çift hidrolik sistemlerin kullanılması hasar ve hidrolik kaybı olması durumunda büyük bir güvenlik açığı ortaya çıkmaktadır. Çeviklik ve yüksek manevra kabiliyeti kazanımı ve buna bağlı olarak uçuş kontrol yüzeylerinin hızlı tepkilileri hidrolik sistemlerle güvenilir olarak kullanılmaz durumdadır. Bunun önüne geçebilmek için tüm uçuş kontrol sistemlerinde elektrik tahrikli aktüatörlerin kullanılması hızlı yük değişikliklerine yanıt vermesi beklenmektedir. F-22 Raptor'da kullanılan uçuş kontrol yüzeyleri Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6: T-50, F-22 ve F-16 Uçuş Kontrol Yüzeyleri karşılaştırması

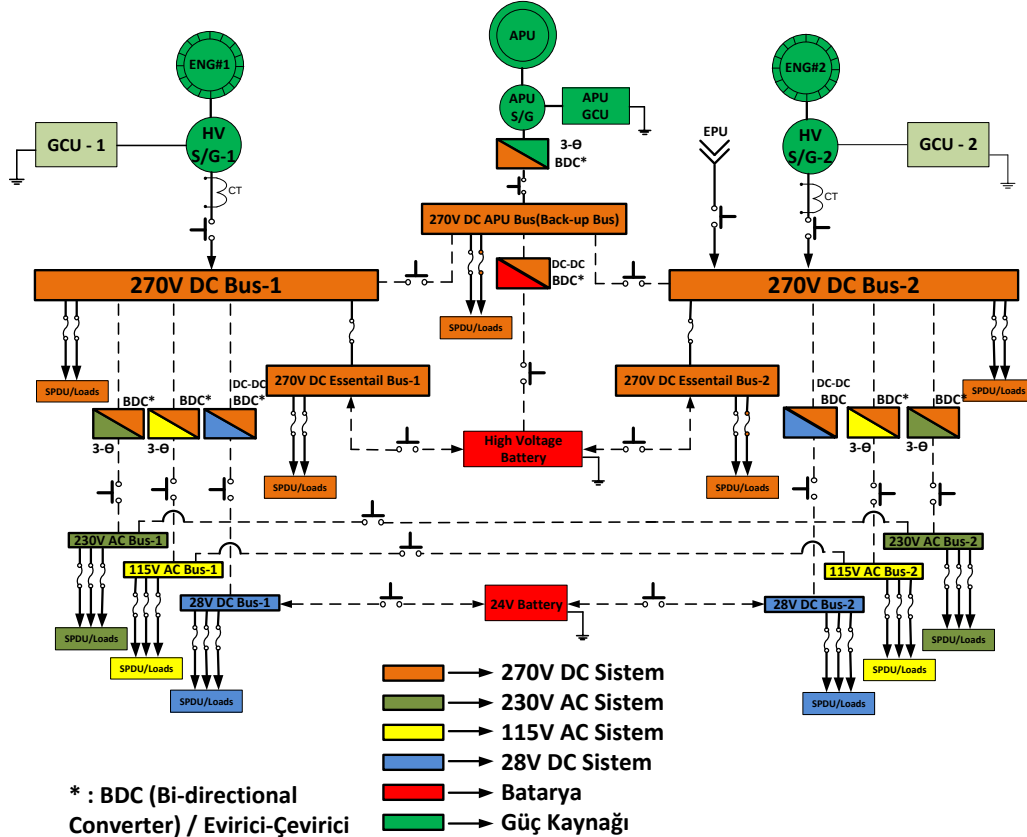
Ek olarak hava araçlarında kullanılan uçuş kontrol yöntemlerin hareket yeteneklerinin karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Hareket Kontrol Yeteneklerinin Karşılaştırılması

Yukarıda verilen tüm nedenlerden dolayı yeni nesil jet avcı uçaklarında yüksek voltaj DC sistemler kullanılmaktadır.

5. Nesil Jet Uçaklarında Kullanılan Kavramsal Güç Üretim ve Dağıtım Sistemi: Hava taşımacılığı birliği (Air Transport Association) şeklinde tanımlanan, uçak bakımında kullanılan ve el kitaplarında kullanılan numaralarında sistemi ATA bölümleri olarak tanımlamıştır. Elektrik güç sistemi ATA24 olarak tanımlanmış ve uçak üzerindeki elektriksel gücün üretildiği veya depolandığı sistemlerin tümünü kapsamaktadır. Elektrik güç dağıtım sistemi ise faydalı yükler ve uçak üzeri tüm alt sistemlerin idamı için üretilen veya depolanan elektriksel gücün kontrol ve korumalı olarak dağıtımını sağlayan alt sistemdir. 270VDC üretece sahip modern bir daha elektrikli uçak için kavramsal elektrik güç dağıtım sistemi Şekil 8’te verilmiştir.



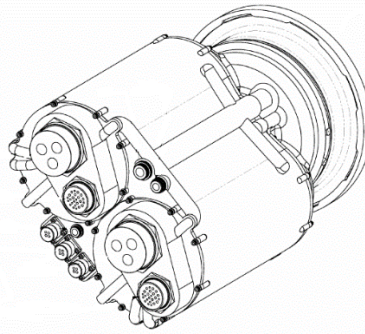
Şekil 8: Daha Elektrikli ATA24 Güç Dağıtım Sistemi Kavramsal Tasarımı

ATA24 Elektrik Güç Üretim ve Dağıtım Sistemi Alt Bileşenleri: ATA24 Elektrik Güç Sistemi temel olarak uçak üzerinde yer alan elektriksel yüklerin tüm güç ihtiyaçlarını uygun kalitede ve kapasitede, emniyetli bir şekilde aktarımını yapan, depolayan ve kontrollü, korumalı ve belli senaryo durumlarına göre dağıtımını gerçekleştiren, otomatik ve manuel yöntemler ile monitör ve kontrol edilmesini sağlayan sistemdir. Sistem temel olarak elektrik güç üretim ve dağıtım sistemi olarak 2 ayrı alt sisteme ayrılmıştır.

Elektrik Güç Üretim Birimleri, daha çok uçak üzerinde bulunan döner mekanik yapılar tarafından elde edilen elektriksel gücü sağlamaktadırlar. Bu birimler temel konfigürasyonda;

- Starter/Jeneratör; motora çalışması için ilk hareketi veren, motor çalıştıktan sonra elektrik üretici olarak çalışacak sistemdir.
- Harici Güç Birimi: Uçağın uçuş öncesi yer operasyonları ve motor çalıştırılması için kullanılan elektrik güç kaynağıdır.
- Acil Durum Jeneratörü; uçağın havada ana güç kaynağında oluşabilecek arızaya karşı (acil durum uçuş modu) güvenli şekilde operasyona devam etmesi iniş yapabilmesine olanak sağlayan yedek güç kaynağıdır.

Jeneratörler, hava aracının motoruna bağlı durumda olup döner yapısındaki sargılar sayesinde duruma göre AC veya DC elektrik üreten birimlerdir. Temel olarak görevi Starter olarak, bataryadan/harici kaynaklardan aldığı elektrik enerjisiyle dönerek uçağın motoruna ilk hareketinin verilmesi ve motorun çalıştırılması, Jeneratör olarak, uçak motoru çalıştırıldıktan sonra motordan aldığı dönüş hareketini dâhilindeki alternatöre aktararak elektrik üretiminin yapılması ve uçağın ana elektrik ihtiyacının karşılanmasıdır.

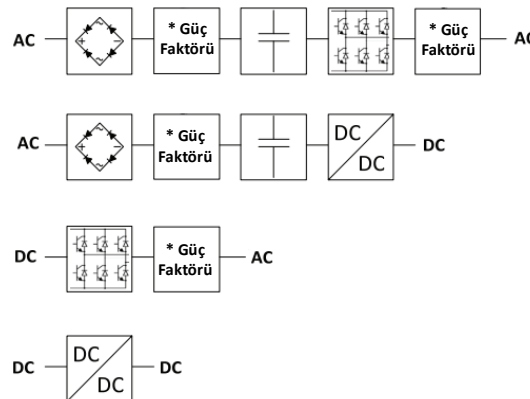


Şekil 9: Çift Çıkışlı 270VDC Starter/Jeneratör[USOO7687928B2, 2010]

Elektrik Güç Dağıtım Sistemi ise faydalı yükler için üretilen veya depolanan kaliteli elektriksel gücün kontrollü ve korumalı olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Tüm dağıtım işlemi güç kontrol ve dağıtım birimleri tarafından ikincil güç dağıtım birimlerine uygun uçuş ve operasyon modlarında aktaran birimlerdir. Elektrik Güç sistemlerinde kullanılan çeşitli voltaj standartları şu şekildedir;

- 230VAC/400Hz-Değişken Frekanslı
- 115VAC/400Hz-Değişken Frekanslı
- 270 VDC
- 28 VDC

Yukarıda belirtilen voltaj seviyelerinin tamamını ATA24 elektrik güç sisteminde kullanabilmek için uçağın birincil güç kaynağından alınan elektrik gücü her bir ekipman için uygun voltaj değerlerine evirici-çevirici birimleri kullanılarak sistemlere uygun voltaj seviyesi sağlanır. Tüm evirici-çevirici işlemlerinin fonksiyonel blok diyagramları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: Evirici-Çevirici Birim Diyagramları

UYGULAMALAR

Modern Elektrik Güç Sisteminin Kavramsal Güç Dağıtım Tasarımına Göre Kablo Ağırlık ve Dönüşüm Birimleri Ağırlık Analizi

Uçakların üretiminde kullanılan güç iletim kabloları tüm uçağın ağırlığına ciddi bir etki yapmaktadır. Bu kapsamda kullanılan güç kablolarının ağırlığının azaltılması ve elektrik enerjisini tüm dağıtım sisteminde iletme bağlı kaybı minimuma indirmek amacıyla yüksek voltaj üretim ve dağıtım teknolojisi yeni nesil uçakların tamamında kullanılmaktadır.

Genel güç dağıtım mimarisini doğrudan etkileyecek elektrik sisteminin seçilmesi için bu çalışmada kavramsal güç dağıtım tasarımı üzerinden biri 270VDC diğeri 230VAC üreteç olacak şekilde iki farklı starter jeneratör seçilerek analiz yapılacaktır. Analizde yapılacak varsayımlar aşağıda verilmiştir.

1. Şekil 8’de verilen kavramsal güç dağıtım sistemi üzerinden 270VDC, 230VAC ve 115VAC üç farklı mimarı kullanılacaktır.
2. Yapılacak analizde güç üretimi yaklaşımı 5.nesil uçaklara uygun değerde 60kW olarak seçilmiştir.
3. Analizde kullanılacak iletkenler %20-%30 güvenlik payı dahil olmak üzere IEC Article310-18 ve 310-19’da verilen taşıma kapasiteleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılacaktır.
4. Güç dönüşüm birimlerinde kayıplar %5, iletim kablolarındaki kayıplar %1 olarak hesaplamalar yapılacaktır.
5. Hava aracında kullanılacak toplam kablo uzunluğu bilinmediği için metre cinsinden β katsayısı belirlenmiş olup sabit değişken olarak hesaplamalarda kullanılacaktır.
6. Uzun iletim hatlarında yüksek voltaj seviyeli güç sistemi kullanılacağı varsayılarak tüm elektrik güç sisteminde normalize edilmiş kablo uzunluk tahmini 270VDC sistem için 4 β metre, 230VAC sistem için 3 β metre, 115VAC sistem için 2 β metre ve 28VDC sistem için 1 β metre olarak kabul edilmiştir.
7. Yapılacak analizde kablo ağırlığı tahmini için havacılık ve uzay sanayinde kullanılan M22759 / 43 tipi kablolar kullanılacaktır.
8. Dönüşüm ünitelerinin ağırlık tahmini Tablo 2 referans alınarak yapılmıştır.
9. Tüm analizler elektrik güç tasarımında bir üreteç kullanılarak yapılmış olup 2 üreteç kullanılacak sistemler için sonuçlar 2 katına çıkarılmalıdır.

Tablo 1: AWG boyutuna göre M22759/43 tipi kablo ağırlık bilgisi

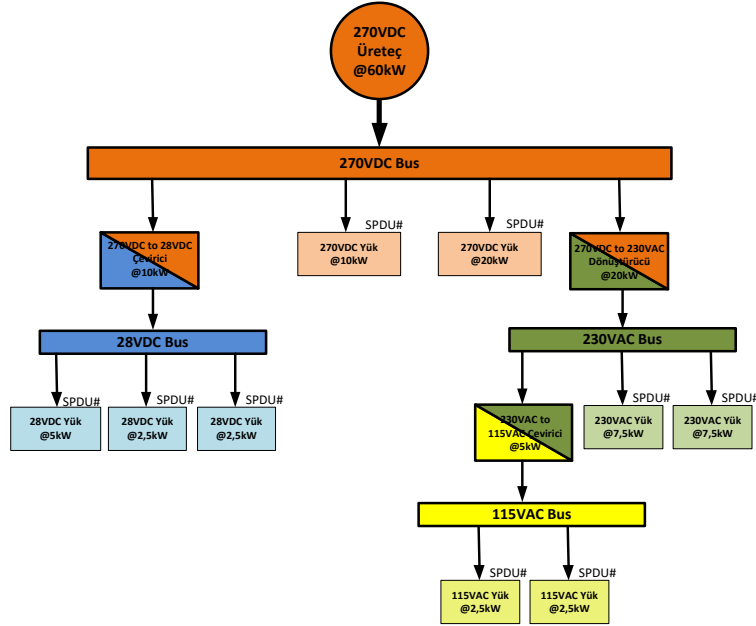
Parça Numarası	AWG	Ağırlık kg/km
M22759/43-18	18	10,71
M22759/43-16	16	13,39
M22759/43-14	14	20,54
M22759/43-12	12	30,51
M22759/43-10	10	48,22
M22759/43-8	8	92,12
M22759/43-6	6	140,63
M22759/43-4	4	235,13
M22759/43-2	2	355,67
M22759/43-01	1/0	572,94

Tablo 2: Güç Çevirici Birimlerinin Tipik Güç Yoğunluğu [Brombach, Lücken, Schroeter, Schulz, 2012]

No	Çevirici Tipi	Tipik Güç Yoğunluğu
1	AC/AC Çevirici	1.43 kg/kW
2	AC/DC Dönüştürücü	0.51 kg/kW
3	DC/AC Dönüştürücü	0.95 kg/kW
4	DC/DC Çevirici	0.17 kg/kW

270VDC Güç Üretim ve Güç Dağıtım Sistemi: 270VDC Elektrik güç üretim ve dağıtım sistem mimarisi bir adet 270VDC Üreteç, bir adet 270VDC-230VAC dönüştürücü, iki adet 270VDC yük, bir

adet 270VDC-28VDC çevirici, üç adet 28VDC yük, bir adet 230VAC-115VAC çevirici, iki adet 230VAC yük ve iki adet 115VAC yükten oluşmaktadır. Kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisi gerilim tipi ve seviyesine göre baralar ile bağlanmıştır. Şekil 11’de kavramsal mimari gösterilmektedir.



Şekil 11: 270VDC Elektrik Güç Üretim ve Dağıtım Mimarisi

270VDC üreteç kullanılan kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisinde kullanılacak ünitelerin tahmini ağırlığı Tablo 3'te, sistemde kullanılacak kabloların tahmini ağırlığı Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 3: 270VDC Sistem için Güç Yoğunluğuna Göre Tahmini Ünitelerin Tahmini Ağırlığı

No	Çevirici Tipi	Tipik Güç Yoğunluğu	Nominal Güç	Yaklaşık Ağırlık
1	AC/AC Çevirici	1.43 kg/kW	5 kW	7,15 kg
2	AC/DC Dönüştürücü	0.51 kg/kW	-	-
3	DC/AC Dönüştürücü	0.95 kg/kW	20kW	19 kg
4	DC/DC Çevirici	0.17 kg/kW	10kW	1,7 kg

Tahmini çevirici/dönüştürücü birimlerin tahmini toplam ağırlığı 27,85 kg'dır.

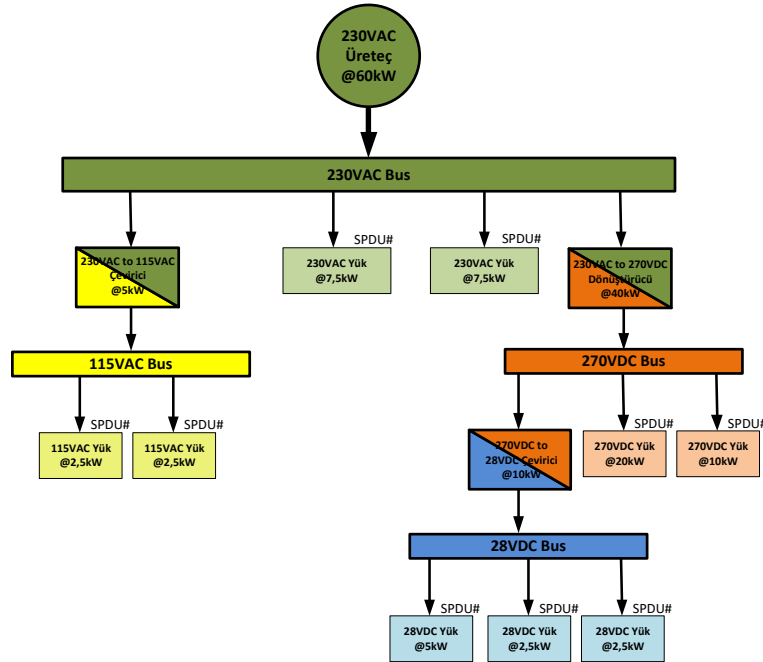
Tablo 4: 270VDC sistemde Optimize Edilen Kablo Ağırlık Tahmini

Ekipman Tipi, Güç @ Nominal Voltaj	Çıkış akımı, İndirgenmiş Kablo Bilgisi (@200°C)	Kablo Ağırlık Yoğunluğu, Kablo uzunluğu, Optimize Ağırlık
230VAC Üreteç 60kW@230VAC	211A 2 x 2 AWG	0,711 kg/m 4 β metre 2,844 β kg
270VDC Yük-1 20kW@270VDC	73A 2 x 10 AWG	0,096 kg/m 4 β metre 0,384 β kg
270VDC Yük-2 10kW@270VDC	36A 2 x 14 AWG	0,041 kg/m 4 β meter 0,164 β kg
270VDC-230VAC Dönüştürücü(3 faz) 20kW@230VAC	81A = 27A/Faz 4 x 14 AWG	0,082 kg/m 3 β metre 0,246 β kg
230VAC Yük-1 7.5kW@230VAC	33A = 10A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg
230VAC Yük-2 7.5kW@230VAC	33A = 10A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg

Tablo 5: 270VDC sistemde Optimize Edilen Kablo Ağırlık Tahmini (Tablo 4 devamı)

Ekipman Tipi, Güç @ Nominal Voltaj	Çıkış akımı, İndirgenmiş Kablo Bilgisi (@200°C)	Kablo Ağırlık Yoğunluğu, Kablo uzunluğu, Optimize Ağırlık
270VDC-28VDC Çevirici 10kW@28VDC	335A 2 x 0 AWG	1,145 kg/m 1 β metre 1,145 β kg
28VDC Yük-1 5kW@28VDC	176A 2 x 4 AWG	0,506 kg/m 1 β metre 0,506 β kg
28VDC Yük-2 2.5kW@28VDC	88A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
28VDC Yük-3 2.5kW@28VDC	88A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
230VAC-115VAC Dönüştürücü(3 faz) 5kW@115VAC	45A = 15A/Faz 4 x 16 AWG	0,053 kg/m 2 β metre 0,106 β kg
115VAC Yük-1 2.5kW@115VAC	21A = 7A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
115VAC Yük-2 2.5kW@115VAC	21A = 7A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
Optimize Edilen Toplam Kablo Ağırlık Tahmini		6,183 β kg

230VAC Güç Üretim ve Güç Dağıtım Sistemi: 230VAC Elektrik güç üretim ve dağıtım sistem mimarisi bir adet 230VAC Üreteç, iki adet 230VAC yük, bir adet 230VAC-270VDC Dönüştürücü, iki adet 270VDC yük, bir adet 270VDC-28VDC Çevirici, üç adet 28VDC yük, bir adet 230VAC-115VAC çevirici ve iki adet 115VAC yükten oluşmaktadır. Kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisi gerilim tipi ve seviyesine göre baralar ile bağlanmıştır. Şekil 12’de kavramsal mimari gösterilmektedir.



Şekil 12: 230VAC Elektrik Güç Üretim ve Dağıtım Mimarisi

230VAC üreteç kullanılan kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisinde kullanılacak ünitelerin tahmini ağırlığı Tablo 6’da, sistemde kullanılacak kabloların tahmini ağırlığı Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6: 230VAC Sistem için Güç Yoğunluğuna Göre Tahmini Ünitelerin Tahmini Ağırlığı

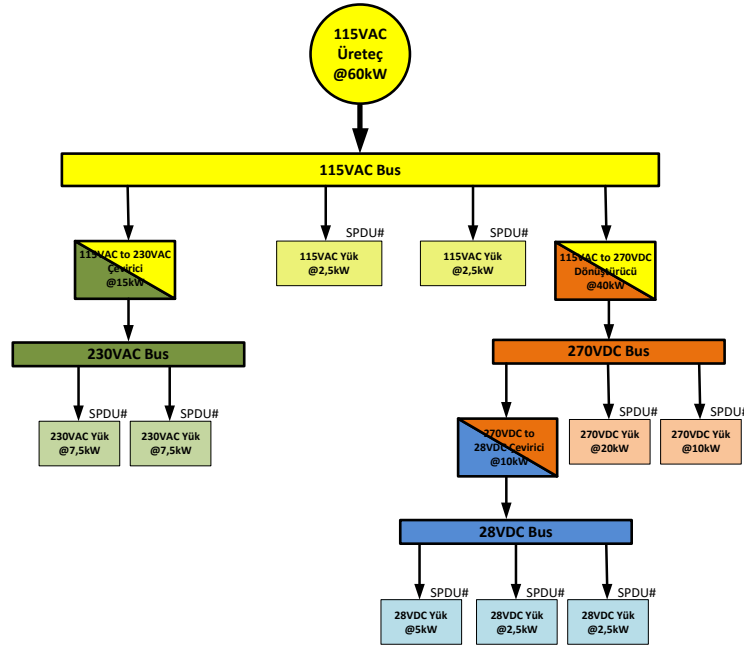
No	Çevirici Tipi	Tipik Güç Yoğunluğu	Nominal Güç	Yaklaşık Ağırlık
1	AC/AC Çevirici	1.43 kg/kW	5 kW	7,15 kg
2	AC/DC Dönüştürücü	0.51 kg/kW	40kW	20,4 kg
3	DC/AC Dönüştürücü	0.95 kg/kW	-	-
4	DC/DC Çevirici	0.17 kg/kW	10kW	1,7 kg

Tahmini çevirici/dönüştürücü birimlerin tahmini toplam ağırlığı 29,25 kg'dır.

Tablo 7: 230VAC sistemde Optimize Edilen Kablo Ağırlık Tahmini

Ekipman Tipi, Güç @ Nominal Voltaj	Çıkış akımı, İndirgenmiş Kablo Bilgisi (@200°C)	Kablo Ağırlık Yoğunluğu, Kablo uzunluğu, Optimize Ağırlık
230VAC Üreteç 60kW@230VAC	258A = 86A/Faz 4 x 6 AWG	0,562 kg/m 3 β metre 1,686 β kg
230VAC Yük-1 7.5kW@230VAC	32A = 11A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg
230VAC Yük-2 7.5kW@230VAC	32A = 11A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg
230VAC-270VDC Dönüştürücü 40kW@270VDC	139A 2 x 4 AWG	0,470 kg/m 4 β metre 1,88 β kg
270VDC Yük-1 10kW@270VDC	36A 2 x 14 AWG	0,042 kg/m 4 β metre 0,168 β kg
270VDC Yük-2 20kW@270VDC	72A 2 x 10 AWG	0,096 kg/m 4 β metre 0,384 β kg
270VDC-28VDC Çevirici 10kW@28VDC	335A 2 x 0 AWG	1,145 kg/m 1 β metre 1,145 β kg
28VDC Yük-1 5kW@28VDC	176A 2 x 4 AWG	0,506 kg/m 1 β metre 0,506 β kg
28VDC Yük-2 2.5kW@28VDC	88A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
28VDC Yük-3 2.5kW@28VDC	88A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
230VAC-115VAC Dönüştürücü(3 faz) 5kW@115VAC	45A = 15A/Faz 4 x 16 AWG	0,053 kg/m 2 β metre 0,106 β kg
115VAC Yük-1 2.5kW@115VAC	21A = 7A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
115VAC Yük-2 2.5kW@115VAC	21A = 7A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
Optimize Edilen Toplam Kablo Ağırlık Tahmini		6,627 β kg

115VAC Güç Üretim ve Güç Dağıtım Sistemi: 115VAC Elektrik güç üretim ve dağıtım sistem mimarisi bir adet 115VAC Üreteç, iki adet 115VAC yük, bir adet 115VAC-230VAC Çevirici, iki adet 230VAC yük, bir adet 115VAC-270VDC Dönüştürücü, iki adet 270VDC yük, bir adet 270VDC-28VDC çevirici ve üç adet 28VDC yükten oluşmaktadır. Kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisi gerilim tipi ve seviyesine göre baralar ile bağlanmıştır. Şekil 13'de kavramsal mimari gösterilmektedir.



Şekil 13: 115VAC Elektrik Güç Üretim ve Dağıtım Mimarisi

115VAC üreteç kullanılan kavramsal elektrik güç dağıtım mimarisinde kullanılacak ünitelerin tahmini ağırlığı Tablo 8'de, sistemde kullanılacak kabloların tahmini ağırlığı Tablo 9 ve 10'da verilmiştir.

Tablo 8: 115VAC Sistem için Güç Yoğunluğuna Göre Tahmini Ünitelerin Tahmini Ağırlığı

No	Çevirici Tipi	Tipik Güç Yoğunluğu	Nominal Güç	Yaklaşık Ağırlık
1	AC/AC Çevirici	1.43 kg/kW	15 kW	21,45 kg
2	AC/DC Dönüştürücü	0.51 kg/kW	40kW	20,4 kg
3	DC/AC Dönüştürücü	0.95 kg/kW	-	-
4	DC/DC Çevirici	0.17 kg/kW	10kW	1,7 kg

Tahmini çevirici/dönüştürücü birimlerin tahmini toplam ağırlığı 43.55 kg'dır.

Tablo 9: 115VAC sistemde Optimize Edilen Kablo Ağırlık Tahmini

Ekipman Tipi, Güç @ Nominal Voltaj	Çıkış akımı, İndirgenmiş Kablo Bilgisi (@200°C)	Kablo Ağırlık Yoğunluğu, Kablo uzunluğu, Optimize Ağırlık
115VAC Üreteç 60kW@115VAC	495A = 165A/Faz 4 x 4 AWG	0,940 kg/m 2 β metre 1,880 β kg
115VAC Yük-1 2.5kW@115VAC	21A = 18A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
115VAC Yük-2 2.5kW@115VAC	21A = 11A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 2 β metre 0,084 β kg
115VAC-230VAC Dönüştürücü(3faz) 15kW@230VAC	62A = 21A/Faz 4 x 12 AWG	0,122 kg/m 3 β metre 0,366 β kg
230VAC Yük-1 7.5kW@230VAC	31A = 11A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg
230VAC Yük-2 7.5kW@230VAC	31A = 11A/Faz 4 x 18 AWG	0,042 kg/m 3 β metre 0,126 β kg
115VAC-270VDC Dönüştürücü 40kW@270VDC	140A 2 x 4 AWG	0,470 kg/m 4 β metre 1,88 β kg

Tablo 10: 115VAC sistemde Optimize Edilen Kablo Ağırlık Tahmini (Tablo 9 devamı)

Ekipman Tipi, Güç @ Nominal Voltaj	Çıkış akımı, İndirgenmiş Kablo Bilgisi (@200°C)	Kablo Ağırlık Yoğunluğu, Kablo uzunluğu, Optimize Ağırlık
270VDC Yük-1 20kW@270VDC	70A 2 x 6 AWG	0,281 kg/m 4 β metre 1,124 β kg
270VDC Yük-2 10kW@270VDC	35A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 4 β metre 0,736 β kg
270VDC-28VDC Çevirici 10kW@28VDC	340A 2 x 0 AWG	1,145 kg/m 1 β metre 1,145 β kg
28VDC Yük-1 5kW@28VDC	170A 2 x 4 AWG	0,470 kg/m 1 β metre 0,470 β kg
28VDC Yük-1 2.5kW@28VDC	85A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
28VDC Yük-1 2.5kW@28VDC	85A 2 x 8 AWG	0,184 kg/m 1 β metre 0,184 β kg
Optimize Edilen Toplam Kablo Ağırlık Tahmini		8,389 β kg

DEĞERLENDİRME

Hava araçları teknolojisindeki gelişmeler, uçak ve helikopterleri daha karmaşık yapıya dönüştürmüş, teknolojik gelişmelerin yanında hava araçları için birçok farklı görev tanımları ve görevlerine özel çeşitli tasarımlar ortaya çıkmıştır. Tüm bu gelişmeler hava araçlarında daha çok elektrik enerjisi kullanılması ihtiyacını doğurmuş durumdadır.

Havacılık sektöründe kullanılan tüm ekipmanlar tasarlanırken tasarımı yapılan birimler ve kullanılacak sistemlerden optimum düzeyde faydalanmak gerekmektedir. Bu da hava araçlarında kullanılacak elektrik iletim hatlarının toplam uzunluk ve ağırlığı, ATA24 Elektrik güç sisteminde kullanılacak üreteç, evirici ve çeviricilerin ağırlık ve performanslarını ekstra önemli hale getirmektedir.

Farklı askeri tip uçakların elektrik güç ihtiyaçlarının karşılaştırılması Tablo 9'da verilmiştir. Buna bağlı olarak uygulamalar ve değerlendirme bölümünde verilen analiz sonucuna göre 270VDC, 230VAC ve 115VAC üreteçlerin kullanıldığı elektrik güç sistemlerinin evirici-çevirici birimlerinin ve sistemlerde kullanılacak kablo demetlerinin ağırlık tahminleri Tablo 10'da özetlenmektedir.

Tablo 9: Uçak Üzeri Elektrik Güç Üretim Sistemleri[Xia, 2011]

Jeneratör Tipi	Hava Aracı Üzeri Uygulamalar	
115VAC/400Hz (Cycloconverter-VSCF: değişken hızlı sabit frekans)	F18C/D	2x40/45kVA
	F18E/F	2x60/65kVA
115VAC/380-760Hz (VF: Değişken frekans)	Boeing JSF (X-32A/B/C)	2x50kVA
230VAC/380-760Hz (VF: Değişken frekans)	B787 (* Sivil uygulama)	4x250kVA + 2x225kVA
270VDC	F-22 Raptor	2x70kW
	Lockheed JSF (X-35A/B/C)	2x50kW

Tablo 10: Elektrik Güç Mimarilerinin Ağırlık Özelinde karşılaştırılması

No	Mimari Tipi	Evirici-Çevirici Ağırlık tahmini	Kablo Ağırlık Tahmini
1	270VDC	27,85 kg	6,183 β kg
2	230VAC	29,25 kg	6,627 β kg
3	115VAC	43,55 kg	8,389 β kg

SONUÇ

Ağırlık perspektifi ile ilgili olarak, 270VDC sistemi aynı güç değerinde daha hafif bir ekipman konfigürasyonuna sahip olacağı belirlenmiştir. Ayrıca, 270VDC sistem kablo demeti ağırlığı ve 230VAC sistem kablo demeti ağırlığı arasındaki oran yaklaşık olarak 0,933(M270VDC kablaj/M230VAC kablaj), 270VDC sistem kablo demeti ağırlığı ve 115VAC sistem kablo demeti ağırlığı arasındaki oran yaklaşık olarak 0,737(M270VDC kablaj/M115VAC kablaj) olarak belirlenmiştir. Yapılan tüm analiz sonuçlarına göre yeni nesil hava araçlarında ATA24 elektrik güç sistemi 270VDC perspektifinde tasarlanmasının en optimal sonuç olduğu değerlendirilmektedir. Gelişen teknoloji perspektifinde havacılık elektrik güç üretim ve dağıtım sistemleri konusunda yapılan analiz ve sektör portföyü dikkate alındığında 540VDC üreteçlerin kullanılması yönünde teknolojik gelişmelerin yaşanması beklenmektedir.

Kaynaklar

- Brombach Johannes, Lücken Arno, Schroeter Torben, Detlef Schulz January 2012 *Optimizing the Weight of an Aircraft Power Supply System through a +/-270 VDC Main Voltage*, Przegląd Elektrotechniczny
- Erdem, Erdoğan, Ocaklı, Yılmaz, 2018 *Aviyonik Güç Dağıtım Sistemleri Ve İrtifanın Hava Araçlarında Kullanılan İletim Hatları Üzerindeki Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi*, VII. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
- Fokke Mentjes *Electrically Driven General Systems for UAV's* EADS Deutschland GmbH
- John, McHale, 1 May 2010 *F-35 avionics: an interview with the Joint Strike Fighter's director of mission systems and software* Military & Aerospace Electronics.
- Lutz Warsitz, January 2009 *Pen and Sword Books-UK The First Jet Pilot-The story of german test pilot Erich Warsitz* ISBN: 978-1844158188.
- National Aeronautics and Space Administration FS-2008-6-030-DFRC SR-71 Blackbird*
- Patent: Mar. 30, 2010 *DUAL-STRUCTURED AIRCRAFT ENGINE STARTER/GENERATOR* Patent No.: US 7.687,928 B2 Date of, Patent Barkod No: USOO7687928B2
- Xiuxian Xia, February 2011 *Dynamic Power Distribution Management for All Electric Aircraft* CRANFIELD UNIVERSITY