

# Uçak Elektrik Güç Sistemleri Teknolojileri ve Eğilimleri

Bengi Koç

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. TUSAŞ, Ankara

e-posta: [bkoc@tai.com.tr](mailto:bkoc@tai.com.tr)

## Özetçe

Bu bildiri amaç, emniyet seviyelerinin ve geliştirilen sistemlerin elektrik gücüne bağımlılıklarının artması ile karmaşıklaşan uçak elektrik güç sistemleri teknolojilerine genel bir bakış sağlamak ve eğilimleri ortaya koymaktır.

## 1. Giriş

Sivil havacılıkta, 1900-1930 yılları arasında “uçakların düşmek için fazlasıyla iyi olduğu” düşüncesi belli miktarda uçuş saati için geçerliliğini koruduktan sonra pek çok kazanın yaşanmasıyla geçerliliğini yitirmiş ve 1930-1940 yılları arasında yedekleme amacıyla eklenen ilave motor, radyo ve hız göstergeleri halkın güvenini sağlamaya yetmemiştir. 1945-1955 yılları arasında tek hata konsepti ortaya çıkmış ve olasılığından bağımsız olarak fonksiyonların tek hatadan yerine getirilememeleri durumlarının analizi yapılarak fonksiyonların emniyetli kalkış, uçuş ve iniş için gereken kritiklik seviyeleri ile hata olasılıklarının uyumlulukları gösterilmeye başlanmıştır. Bu sayede emniyet seviyeleri yükselen uçakların tasarlanmasına bağlı olarak kazaların azalması ile, halkın güveni ve dolayısıyla hava yolu taşımacılığı artmıştır. Ancak, uçuş saatleri arttıkça çoklu hata kombinasyonları nedeniyle kazalar görülmeye başlamış ve 1955'ten bu yana tek hata ve tüm öngörülen hata kombinasyonları değerlendirilmeye başlanmış ve zaman içinde meydana gelen kazalardan öğrenilen derslerle havacılık kuralları güncellenmiştir [1]. Havacılık kurallarının kanla yazıldığı söylenile gelmesinin nedeni budur.

Son yıllarda, uçak performansının optimizasyonu, güvenilirliğinin artırılması ve başlangıç ile idame maliyetinin azaltılması amacıyla, hidrolik, mekanik ve pnömatik güç sistemlerinin yerini elektrik gücünün alması eğilimine girilmiştir [2].

Elektrik, hidrolik, mekanik ve pnömatik güç kaynaklarının karşılaştırılması Tablo 1’de verilmiştir.

Bu gelişmelere paralel olarak elektrik güç kalite standartlarının yükselmesi, elektrik güç kaynakları ile dağıtım sisteminin uyumlu şekilde çalışabilmesine yönelik güç üretim ve dağıtım elemanlarının, güç çeviricilerin, kontrol ve koruma elemanlarının gelişmesine ve güç izleme-koruma-yönetim sistemleri gibi yeni konseptlerin doğmasına neden olmuştur.

Kazalardan öğrenilen derslerle giderek daha fazla zorlayıcı hale gelen havacılık kuralları, hidro-mekanik-pnömatik güç sistemleri yerine elektrik güç sisteminin kullanılması eğilimi ile uçak fonksiyonlarının ve emniyet seviyelerinin artışına paralel gelişen uçak sistemleri, elektrik güç sisteminin kapasitesinin artarak kompleksleşmesi ihtiyacını doğurmuştur.

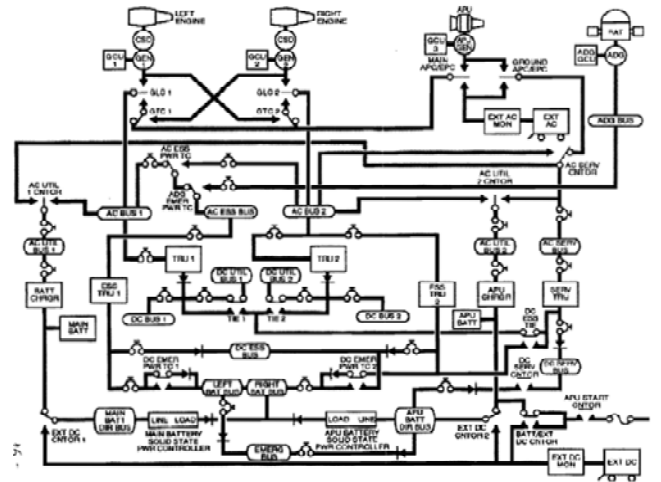
Tablo 1: Uçak güç sistemlerinin karşılaştırılması [3]

Sistem	Komplekslik	Bakım	Teknolojik Olgunluk
Elektrik	Kompleks	Basit	Sistem (olgun) Yeni teknolojiler (olgun değil)
Hidrolik	Basit	Kompleks ve Tehlikeli	Olgun
Mekanik	Fazla kompleks	Sıklıkla ve zaman alıcı	Çok olgun
Pnömatik	Basit	Kompleks	Çok olgun

Elektrik güç sistemi, uygulamaya göre farklılık göstermekle birlikte, uçaklarda 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 sağlar.

Uçak elektrik sistemi temel olarak elektrik güç üretim ve dağıtım sistemleri olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır.

Şekil 1’de uçak elektrik güç üretim ve dağıtım sistemi mimari örneği bulunmaktadır.



Şekil 1: Uçak elektrik güç üretim ve dağıtım sistemi mimari örneği [1]

## 2. Elektrik Güç Üretim Sistemi

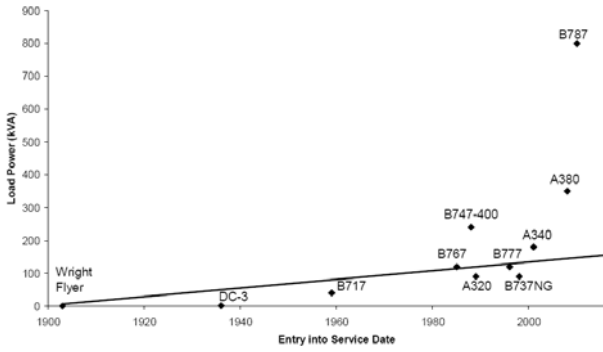
Elektrik güç üretim sistemi birincil ve ikincil olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

### 2.1. Birincil Elektrik Güç Üretimi

Birincil güç kaynakları, mekanik enerjiden elektrik enerjisi üreten kaynaklardır. Birincil güç üretiminde DC sistemlerde 28V DC gerilim, AC sistemlerde ise 3 faz, faz-nötr gerilimi 115 V AC, 400 Hz olan güç kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Büyük yolcu ya da kargo uçaklarındaki gibi elektrik ihtiyacı daha yüksek olan uçakların birincil güç üretim kaynaklarında güç iletimindeki kayıpların ve gerilim düşümünün asgariye indirilmesi amacıyla 270 V DC ya da 115 V AC gibi daha yüksek gerilim seviyeleri tercih edilmektedir.

Sivil uçaklardaki elektrik güç kapasitesi eğilimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Son yıllardaki elektrik güç ihtiyacının eğilim çizgisinin oldukça üzerinde olması dikkat çekicidir [3].



Şekil 2: Sivil uçaklarda elektrik güç ihtiyacı eğilimi [3]

Birincil güç üretim sistemleri kontrol ve koruma elemanları temel olarak şu fonksiyonlara sahiptirler [4]:

#### Kontrol Fonksiyonları:

- Gerilim Regülasyonu: Ekipmanların çalışma gerilimleri ve yüklerle sağlanan gücün MIL-STD-704 [5] ya da RTCA DO-160E [6] gibi havacılık standartlarına uyumlu olması gerekmektedir. Bunun için hem birincil güç üretim elemanlarının, hem de dağıtım sistemi, koruma ve iletim hatlarındaki güç kalitesinin (gerilim, frekans aralığı ve anlık kesintiler gibi) belli sınırlar dâhilinde olması gerekmektedir. Gerilim regülasyonu fonksiyonu ile sistemde bazı elemanların arızalanmaları senaryoları ve uçağın görev profili de göz önünde bulundurularak, tüm olası çalışma koşulları ve güç ihtiyaçlarında, güç üretim elemanlarının gerilim kalitesinin standartlara uyumlu olması sağlanmaktadır.

- Paralel Operasyon: Paralel operasyon fonksiyonu, birincil güç kaynaklarının paralel çalıştığı uygulamalarda, hem normal çalışma koşullarında güç kaynaklarının her birine eşit yükleme yapılması, hem de güç kaynaklarının bir kısmının kaybı durumunda gerekli yüklerin kalan güç kaynaklarına aktarılmasını sırasında güç kalitesinin kabul edilebilir limitler dâhilinde olmasını sağlamaktadır.

#### Koruma Fonksiyonları:

- Ters Akım Koruması: Ters akım korumasının amacı elektrik gücü sağlayan güç kaynaklarının, istemsiz olarak diğer güç kaynakları tarafından beslenmelerini engellemektir.
- Yüksek/Düşük Gerilim Koruması: Birincil güç kaynaklarının iç devrelerinde oluşabilecek bazı hatalar, çıkış geriliminin gerilim regülasyonu kontrol fonksiyonu tarafından belli değerler arasında tutulmasına engel olmaktadır. Bu gibi durumlarda yüksek/düşük gerilim koruması devreye girerek güç kaynağının sistemden izole edilmesini sağlamaktadır.

Güç kaynakları kapasitelerinin tüm olası koşullarda ve sürelerde yeterlilikleri, elektrik yük analizi çalışmaları ile değerlendirilmektedir. Bunun için elektrik güç ihtiyacı olan ekipmanların en fazla, nominal, anlık güç ihtiyaçları, güç üretim elemanları kayıpları da dahil olmak üzere bazı elemanların arızalanmaları senaryoları ve uçağın görev profili de göz önünde bulundurularak, tüm olası çalışma koşullarında hesaplanmakta ve bulunan değerlerin güç kaynaklarının belirlenen senaryolarda sağlayabilecekleri kapasiteler ile uyumlulukları incelenmektedir. Bakım, motor çalıştırma, taksit, kalkış, uçuş, iniş ve acil durumlar ile uçağa özel ilave durumlar, gece, buzlu hava koşulları, aletli uçuş koşulları da dikkate alınarak incelenmektedir. Sistemde bazı elemanların arızalanmaları durumlarında, acil durum konfigürasyonlarına geçişleri, bazı sistemler otomatik olarak gerçekleştirirken, bazıları pilotun ihtiyaç duyulmayan bazı yükleri kapatmasını gerektirmektedir. Bu gibi durumlarda pilotun uyarılar ile acil durum senaryosunu farkına vararak ilgili acil durum prosedürlerini uygulaması arasında yaklaşık 5 dakikalık süre gerektiği kabul edilerek, bu süre zarfında kapasite kaybına uğramış sistemin elektrik yük ihtiyacını karşılayıp karşılayamayacağı ve söz konusu batarya gibi kapasite sınırlaması olan bir güç kaynağı ise bu süre zarfında henüz kapatılmamış yüklerden dolayı meydana gelebilecek kapasite kaybı dikkate alınmaktadır. Elektrik yük analizi çalışmalarında, temel olarak MIL-E-7016F [7] askeri standardı ve ASTM F 2490 [8] kılavuzu referans alınmaktadır.

### 2.2. İkincil Elektrik Güç Üretimi

İkincil güç kaynakları, elektrik enerjisini farklı gerilim ve frekansta elektrik enerjisine çevirebilen kaynaklar ya da bataryalardır. İkincil güç üretim kaynakları örnek olarak 115 V AC (400 Hz, 1 faz ya da 3 faz) gerilim seviyesinden 28 V DC'ye çeviriciler, 28 V DC'den 115 V AC (400 Hz, 1 faz)'ye çeviriciler, 270 V DC'den 115 V AC (400 Hz, 1 faz ya da 3

faz)'ye çeviriciler ya da 270 VDC'den 28 VDC'ye çeviriciler örnek olarak verilebilir.

İkincil elektrik güç üretim kaynakları olarak kullanılan bataryalar, kritik sistemlere sağlanan gerilim seviyesinin anlık gerilim düşmelerinden etkilenmeyecek şekilde belli limitlerde tutulması, motor çalıştırma, birincil güç kaynaklarının arızalanması durumunda güvenli uçuş ve iniş için gerekli yüklerin yeterli sürelerde beslenmeleri ve acil inişlerde yolcu tahliyesi için gerekli aydınlatmanın sağlanması gibi fonksiyonlar için kullanılabilirler.

Havacılıkta yaygın olarak nikel kadmiyum ve kurşun asit tipi bataryalar kullanılmaktadır. Ancak Lityum-iyon teknolojisi de bazı askeri uçaklarda (F-22, F-35, B-2) ve sivil uçaklarda (A380, B787) kullanılmaya başlanmıştır. Lityum-iyon bataryaların nikel kadmiyum ve kurşun asit bataryalara göre, ağırlık, hacim ve şarj-deşarj sayısı fazlalığı konularında avantajları sayesinde yakıt ekonomisi, görev süresi uzunluğu ve uçuş performansının artması sağlanmaktadır. Lityum-iyon bataryaların dezavantajları ise, başlangıç maliyetlerinin yüksek olması, raf ömürlerinin kısa olması, düşük sıcaklıklarda performanslarının düşük olması ve en önemlisi ciddi güvenlik tehlikelerini barındırmalarıdır [9].

### 3. Elektrik Güç Dağıtım Sistemi

Elektrik güç dağıtım sistemi birincil ve ikincil olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır.

#### 3.1. Birincil Elektrik Güç Dağıtım

Birincil güç dağıtım sistemi, elektrik gücünün olası tüm çalışma koşullarında ve sürelerinde, farklı fonksiyonu olan baralara kadar dağıtımını, gerekli farklı konfigürasyonlara geçişlerin sağlanması, güç kaynaklarında ya da baralarda oluşabilecek arızaların izole edebilmesi için gereken mantık elemanlarını içerir. Elektrik güç dağıtımındaki voltaj düşmeleri, farklı konfigürasyonlara geçişlerdeki anlık kesintiler gibi hususlar dikkate alınarak, elektrik güç kalitesinin limitler dâhilinde tutulması sağlanmaktadır.

Uçaklarda, görev yükleri hariç, elektrik baralar uçuş kritikliklerine göre genel olarak 3 seviyede incelenir [1]:

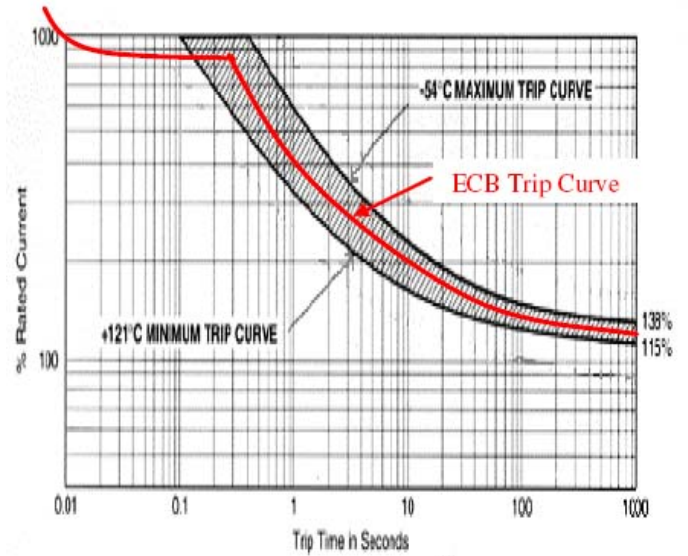
- **Acil durum:** Haberleşme ve yön/irtifa bilgisini sağlayan sistemler ile acil durum ışıklandırma sistemi gibi uçuş kritik sistemlerin beslediği bara(lar)dır.
- **Esas:** Güvenli uçuş ve iniş için gerekli ekipmanların beslediği bara(lar)dır.
- **Esas olmayan:** Yolcu eğlence sistemleri gibi birincil güç kaynakları kapasitelerinin indirgenmesi durumunda çalışmamasında sakınca olmayacak ekipmanların beslediği bara(lar)dır.

#### 3.2. İkincil Elektrik Güç Dağıtım

İkincil güç dağıtım sistemleri, birincil güç dağıtım sistemi tarafından baralara aktarılan elektrik gücünün, yüklere iletimindeki koruma devrelerini içerirler.

İletim hattında kısa devre/aşırı yüklenme durumlarında oluşabilecek yüksek akımlardan koruyan termal devre kesiciler yaygın olarak kullanılmakla birlikte; 1996 B747 ve 1998 MD11 kazalarından [10] sonra kablolama sistemi regülasyonları ve tasarımında ciddi değişiklikler meydana gelmiş ve ark algılayan katı hal devre kesici teknolojileri geliştirilerek, kullanılmaya başlanmıştır.

Şekil 3'de tipik devre kesici açma-kapama grafikleri gösterilmiştir. Ark algılayan devre kesici karakteristiği kırmızı, termal devre kesici karakteristiği siyah eğriler ile belirtilmiştir. Burada dikkat çeken husus, ark algılayan devre kesicinin, termal devre kesici karakteristiğinin tanımlı olduğu bölgelerde (0.1 saniye – 1000 saniye arası) benzer davranış gösterirken, termal devre kesici karakteristiğinin tanımlı olmadığı bölgelerde (0 saniye– 0.1 saniye arası) tanımlı davranış göstermesidir. Bu bölgede (0 saniye – 0.1 saniye arası) ark algılayan devre kesicinin karakteristiği, anlık yüksek güç ihtiyaçlarında devreyi açmayacak şekilde yüksek ama ark oluştuğunda devreyi açacak şekilde düşük olmalıdır.



Şekil 3: Devre kesici örnek açma kapama grafikleri [11]

Ark algılayan devre kesicilerin, termal devre kesicilere göre ark algılayabilme, uçak üzerinde kablolanmanın ve bakım ihtiyacının büyük ölçüde azaltılması gibi avantajlarının bulunmaktadır. Bununla birlikte ark algılayan devre kesicilerin, ark benzeri karakteristiği olabilen aydınlatma, elektrikli fan/pompa, çevirici, ısıtıcı gibi yükleri gerçek arklardan daha iyi ayırt ederek, yanlışlıkla devreyi açmalarının engellenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir [11].

### 4. Kullanıcı Ara yüzü

Genel havacılık kurallarının da gerektirdiği gibi, otomatik kontrollere ilave olarak, her bir elektrik güç kaynağının sisteme dâhil olması/sitemden izole olması elle kontrol edilebilmekte ve elektrik güç sistemine yönelik temel ikaz / göstergeler sağlanmakta; böylece uçuş personeline acil durumlar da dâhil olmak üzere tüm uçuş senaryolarında güvenli uçuşun sağlanabilmesi için sisteme müdahale imkânı verilmekte ve bakım personeline uçuş sonrası arıza tespiti için bilgi sağlanabilmektedir.

## 5. Testler

Sistem fonksiyonu ve performansının doğrulanması için yapılan laboratuvar, yer ve uçuş testlerine ek olarak, ekipmanların çalışabilecekleri çevresel koşullar ile yerleşim bölgelerindeki çevresel koşulların uygunluğunu doğrulamak amacıyla ekipmanlara yönelik yükseklik, sıcaklık, RF yayılım, titreşim, yıldırım, mantar, nem gibi çevresel testler (DO-160 [6], MIL-STD-810 [12] gibi standartlara uygun olarak) yapılmaktadır.

## 6. Sonuçlar

Uçak elektrik sistemleri güç üretim ve dağıtım sistemleri olarak iki alt sistemde, gelişen ve elektrik gücüne bağımlılığı artacak şekilde tasarlanma eğilimindeki sistemlerin ihtiyacını karşılayacak uygun kalite ve kapasitede, emniyetli uçuş ve iniş için yeterli güvenilirliği sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır.

Ağırlık, hacim ve şarj-deşarj sayısının fazlalığı konularındaki avantajlarından dolayı lityum-iyon bataryalar uçaklarda kullanılmaya başlanmış ancak lityum-iyon bataryaların başlangıç maliyetlerinin yüksek, raf ömürlerinin kısa olması gibi dezavantajlarının yanında güvenlik tehlikelerinin azaltılması konularında çalışmalara devam edilmektedir.

Ark algılayan devre kesici teknolojisinde gelişmelere paralel olarak, devre kesici olarak termal yerine ark algılayan devre kesiciler tercih edilmeye başlanmıştır. Ark algılayan devre kesicilerin, ark algılama, uçak üzerinde kablolamanın ve bakım ihtiyacını büyük ölçüde azaltılması gibi avantajları ile birlikte, ark benzeri karakteristiği olan yüklerin gerçek arklardan daha iyi ayırt edilerek, yanlışlıkla devrenin açılmasının engellenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Son yıllarda, uçak performansının optimizasyonu, güvenilirliğinin artırılması ve başlangıç ile idame maliyetinin azaltılması amacıyla, hidrolik, mekanik ve pnömatik güç sistemlerinin yerini elektrik gücünün alması eğilimine girilmesiyle, uçak elektrik güç sistemlerinde özellikle koruma, izleme ve kontrol teknolojilerinde büyük gelişmeler yaşanmaktadır.

## 7. Teşekkür

Tolga Coşkunfırat ve Özkan Altay'a destek ve değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## 8. Kaynakça

- [1] "Systems Job Functions Course Lecture Notes", FAA, Ocak 2009
- [2] A.Emadi, M.Ehsani, "Aircraft Power Systems: Technology, State of the Art and Future Trends", IEEE AES Systems Magazine, Ocak 2000.
- [3] C.R.Avery, S.G.Burrow, P.H. Mellor, "Aircraft Generation and Distribution for the More Electric Aircraft", UPEC 2007
- [4] Moir, I. ve Seabridge A., "Aircraft Systems Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration", Wiley, 2008
- [5] MIL-STD-704E, "Military Standard, Aircraft Electrical Power Characteristics", Department of USA, 1991

- [6] RTCA DO-160E, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", RTCA Incorporated, 2004
- [7] MIL-E-7016F, "Military Specification, Electric Load and Power Source Capacity, Aircraft, Analysis of", US Government of Office, 1981
- [8] ASTM F 2490, "Standard Guide for electrical Load and Power Source Capacity Analysis", ASTM, March 2007
- [9] D.G.Vutetakis, J.B.Timmons, "A Comparison of Lithium-Ion and Lead Acid Aircraft Batteries", 2008 SAE International
- [10] Furse C., ve Haupt R., "Down to the Wire", IEEE Spectrum., Şubat 2001, s 34-39.
- [11] F. Potter, M. Ballas, "Smart Panel Electronic Circuit Breaker Control Technology", 2008 SAE International
- [12] MIL-STD-810F, "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", 5 Mayıs, 2003