Ιπτάμενα… “ Ρεύματα”!

Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στα αεροσκάφη

Συντομογραφίες
APU – Auxiliary Power Unit, (Βοηθητική Μονάδα Ισχύος)
CSD – Constant Speed Drive, (μηχανισμός σταθερών στροφών)

IDG – Integrated Drive Generator, (ενσωματωμένη γεννήτρια σταθερών στροφών)

VFG – Variable-Frequency Generator, (γεννήτρια μεταβλητής συχνότητας)

VSCF – Variable Speed–Constant Frequency, (μεταβλητές στροφές – σταθερή συχνότητα)

RAT – Ram Air Turbine, (ανεμογεννήτρια έκτακτης ανάγκης)

GPU – Ground Power Unit, (εξωτερική επίγεια τροφοδοσία)

MEA – More Electric Aircraft, («περισσότερο ηλεκτρικό» αεροσκάφος)

Από τα «Ιπτάμενα Ραντάρ» στα ιπτάμενα ηλεκτρικά εργοστάσια

Για αρκετά χρόνια πετούσα στη Γερμανία με τα «Ιπτάμενα Ραντάρ» του NATO, τα αεροσκάφη E-3A AWACS. Επρόκειτο για Boeing 707, ειδικά διαμορφωμένα για αποστολές εναέριας επιτήρησης, έγκαιρης προειδοποίησης, διοίκησης και ελέγχου. Η επίσημη ονομασία AWACS προέρχεται από τις λέξεις Airborne Warning and Control System — Εναέριο Σύστημα Προειδοποίησης και Ελέγχου. Το χαρακτηριστικότερο εξωτερικό γνώρισμά τους ήταν, φυσικά, ο τεράστιος περιστρεφόμενος θόλος του ραντάρ, το γνωστό rotodome, επάνω από την άτρακτο και, κυριολεκτικά, επάνω από τα κεφάλια μας.

Ως Ιπτάμενος Μηχανικός αισθανόμουν ιδιαίτερη υπερηφάνεια για την κονσόλα και το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος που διαχειριζόμουν. Το αεροσκάφος, στη διαμόρφωση με την οποία πετούσα, διέθετε εννέα γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 45 kVA η καθεμία: συνολικά περίπου 405 kVA φαινομενικής ηλεκτρικής ισχύος.

Η ισχύς αυτή δεν απαιτούνταν απλώς για την περιστροφή του rotodome, η οποία επιτυγχανόταν υδραυλικά, αλλά κυρίως για τη λειτουργία του πανίσχυρου ραντάρ, των πομπών και δεκτών, των υπολογιστών αποστολής, των πολυάριθμων κονσόλων, των συστημάτων επικοινωνιών, επεξεργασίας δεδομένων και, βεβαίως, του αντίστοιχου θηριώδους συστήματος ψύξης.

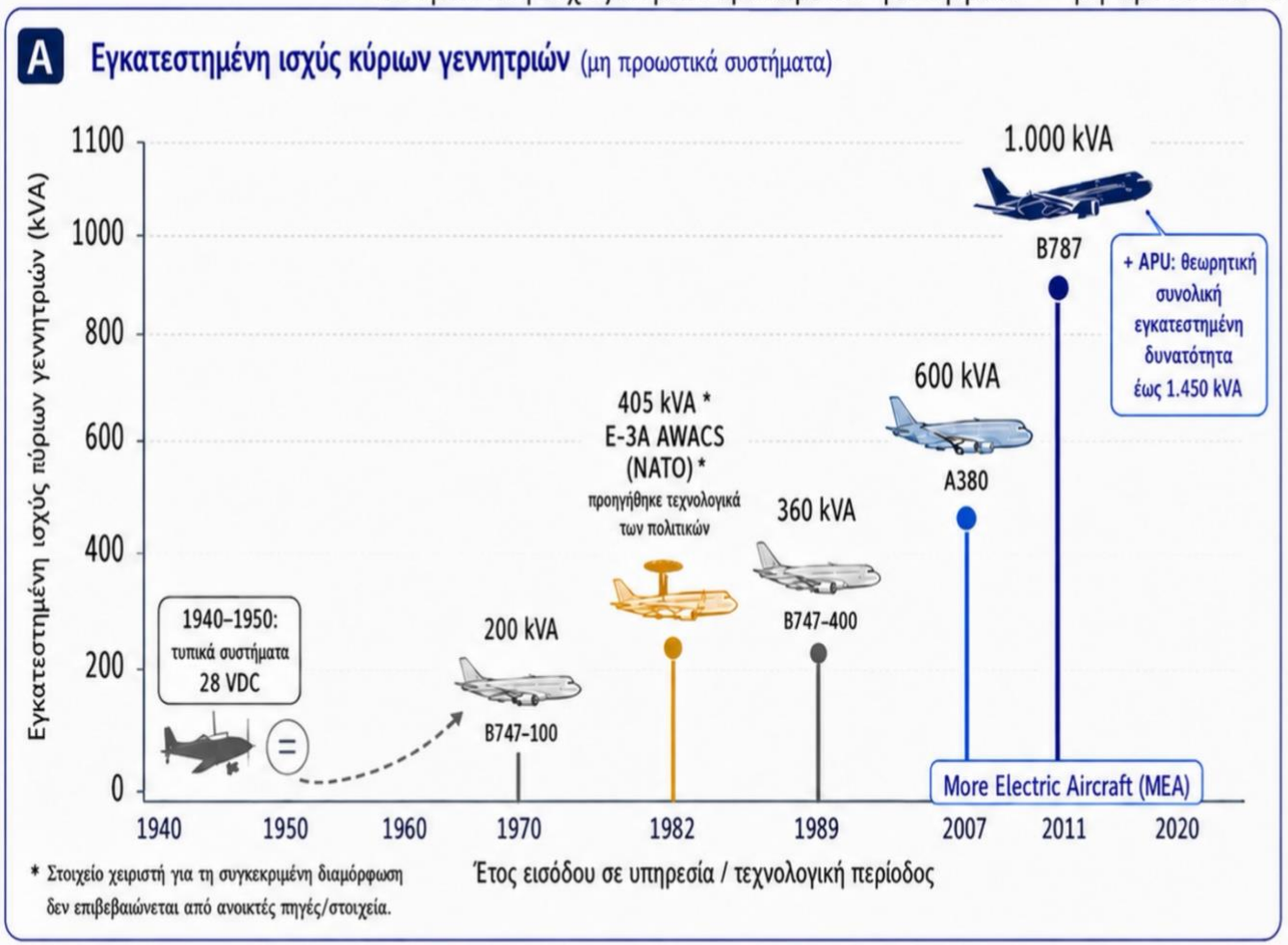
Τα 405 kVA δεν ταυτίζονται υποχρεωτικά με 405 kW πραγματικής ισχύος, διότι η τελική ενεργός ισχύς εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος των φορτίων. Ωστόσο, για να αποκτήσει κανείς μια παραστατική εικόνα, πρόκειται για ηλεκτρική δυνατότητα αντίστοιχη με τις υψηλές ταυτόχρονες απαιτήσεις αρκετών δεκάδων μεγάλων κατοικιών — περίπου σαράντα ή πενήντα, ανάλογα με τις παραδοχές που θα χρησιμοποιηθούν. Και εγώ τότε σκεφτόμουν: «Φυσικά! Πολεμικό αεροσκάφος είναι. Πάρε να ’χεις! »

Δεν μπορούσα, όμως, να φανταστώ ότι μέσα στις επόμενες δεκαετίες όλο και περισσότερα πολιτικά αεροσκάφη θα έμπαιναν στην ίδια κούρσα ηλεκτρικής ισχύος. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει συνοπτικά αυτή την πορεία:

Αεροσκάφος	Τάση / Συχνότητα	Τύπος γεννήτριας	Συνολική ισχύς
E-3A AWACS (NATO)	115 VAC / 400 Hz	σταθερής συχνότητας	~405 kVA
Boeing 747-400	115 VAC / 400 Hz	IDG	360 kVA
Airbus A380	115 VAC / μεταβλητή	VFG	600 kVA
Boeing 787	230 VAC / μεταβλητή	γεννήτριες-εκκινητές	~1.000 kVA (+APU)

Εξέλιξη της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος αεροσκαφών

Ονομαστική ισχύς κύριων ηλεκτρικών γεννητριών — μη προωστικά συστήματα





*Η μετάβαση από τα **28 VDC** στα συστήματα της τάξεως του **1 MVA** αποτυπώνει την πορεία προς το **More Electric Aircraft**, ενώ η υβριδική/ηλεκτρική πρόωση ανήκει σε διαφορετική κλίμακα ισχύος.*

Πηγή: σύνθεση συγγραφέα βάσει δημόσιων τεχνικών στοιχείων — Markos C. Konstantinou

«Εικόνα: Η άνοδος της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος των μεγάλων αεροσκαφών (σε kVA). Από τα ~200 kVA του Boeing 747-100 έως το ~1 MVA κύριας ισχύος του Boeing 787 — και ~1,45 MVA μαζί με τις γεννήτριες της APU. Το E-3A AWACS, στα 405 kVA, ξεπερνούσε ήδη από τη δεκαετία του 1970 πολύ νεότερα πολιτικά αεροσκάφη.»
Και ύστερα εμφανίστηκε το Boeing 787 Dreamliner.

Με δύο μόνο κύριους κινητήρες, το 787 διαθέτει τέσσερις κύριες ηλεκτρικές γεννήτριες-εκκινητές, δύο σε κάθε κινητήρα, ονομαστικής ισχύος 250 kVA η καθεμία. Η συνολική ισχύς των κύριων κινητηρίων γεννητριών φθάνει έτσι τα 1.000 kVA, δηλαδή το ένα MVA — υπερδιπλάσια από εκείνη του AWACS στο οποίο πετούσα. Επιπλέον, η βοηθητική μονάδα ισχύος, η APU, διαθέτει δύο ακόμη γεννήτριες-εκκινητές των 225 kVA. Επομένως, αν συνυπολογιστούν και οι γεννήτριες της APU, η εγκατεστημένη ηλεκτρική παραγωγική ικανότητα του αεροσκάφους φθάνει θεωρητικά τα 1,45 MVA.

Πρόκειται, χωρίς υπερβολή, για ένα πραγματικό ιπτάμενο ηλεκτρικό εργοστάσιο — και μάλιστα χωρίς Ιπτάμενο Μηχανικό! Η αυτοματοποίηση της παραγωγής, της διανομής, της μετατροπής και της προστασίας της ηλεκτρικής ισχύος έχει πλέον αναλάβει λειτουργίες που σε παλαιότερα αεροσκάφη απαιτούσαν συνεχή ανθρώπινη παρακολούθηση.

Από τα 28 VDC στα 400 Hz

Πριν φθάσουμε, όμως, στα ηλεκτρικά μεγαθήρια της εποχής μας, αξίζει να αποδώσουμε τον οφειλόμενο σεβασμό στα αεροπλάνα των δεκαετιών του 1940 και του 1950.

Πολλά αεροσκάφη εκείνης της περιόδου χρησιμοποιούσαν ως κύριο ηλεκτρικό σύστημα συνεχές ρεύμα 28 VDC, συνήθως από μία γεννήτρια σε κάθε κινητήρα. Διέθεταν επίσης συσσωρευτές και, όπου απαιτούνταν εναλλασσόμενο ρεύμα, χρησιμοποιούσαν περιστροφικούς ή στατικούς μεταλλάκτες — inverters — για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

Καθώς όμως τα αεροσκάφη μεγάλωναν και οι ηλεκτρικές απαιτήσεις των βομβαρδιστικών, των μεταγωγικών και αργότερα των πολιτικών αεριωθουμένων αυξάνονταν, το συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης έπαψε να αποτελεί επαρκή λύση για την κύρια διανομή ισχύος.

Σε δεδομένη ισχύ, η αύξηση της τάσης μειώνει το απαιτούμενο ρεύμα. Μικρότερο ρεύμα σημαίνει λεπτότερα και ελαφρύτερα καλώδια, μικρότερες απώλειες λόγω θέρμανσης και αποτελεσματικότερη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στην άτρακτο. Έτσι επικράτησε στα μεγάλα αεροσκάφη το τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος 115/200 VAC και 400 Hz: περίπου 115 V μεταξύ φάσης και ουδετέρου και 200 V μεταξύ δύο φάσεων.

Η συχνότητα των 400 Hz — τετρακόσιοι κύκλοι ανά δευτερόλεπτο — επιλέχθηκε επειδή επιτρέπει την κατασκευή σημαντικά μικρότερων και ελαφρύτερων ηλεκτρικών κινητήρων, γεννητριών και μετασχηματιστών σε σχέση με τα συστήματα των 50 ή 60 Hz που χρησιμοποιούμε στα επίγεια δίκτυα.

Το πρόβλημα των μεταβαλλόμενων στροφών

Οι κύριες γεννήτριες ενός αεριωθουμένου αεροσκάφους παίρνουν μηχανική κίνηση από τους κινητήρες, συνήθως μέσω του κιβωτίου παρελκομένων. Οι κινητήρες, όμως, δεν περιστρέφονται πάντοτε με σταθερές στροφές. Οι στροφές τους μεταβάλλονται ανάλογα με την ώση, τη φάση της πτήσης, το ύψος και τις εντολές του πληρώματος.

Παράλληλα, ένα μέρος της παραγόμενης ισχύος του κινητήρα πρέπει να αποσπάται για τις ανάγκες του ίδιου του αεροσκάφους: ηλεκτρική παραγωγή, υδραυλικές αντλίες, συμπίεση και κλιματισμό, αντιπαγωτική προστασία και άλλα βοηθητικά συστήματα. Το ποσοστό αυτής της μη προωστικής ισχύος είναι συνήθως μόνο μερικές εκατοστιαίες μονάδες, αλλά δεν είναι σταθερό ούτε ίδιο για όλα τα αεροσκάφη.

Για να παράγει μια συμβατική σύγχρονη γεννήτρια ρεύμα σταθερής συχνότητας 400 Hz, πρέπει να περιστρέφεται με σταθερές στροφές. Έτσι, μεταξύ του κινητήρα και της γεννήτριας

τοποθετήθηκε ένας υδρομηχανικός μηχανισμός σταθερών στροφών, ο Constant Speed Drive ή CSD. Αργότερα, ο μηχανισμός σταθερών στροφών και η ηλεκτρική γεννήτρια ενσωματώθηκαν σε μία ενιαία μονάδα, την Integrated Drive Generator — IDG.

Η IDG παραλαμβάνει μεταβαλλόμενες στροφές από τον κινητήρα και διατηρεί σταθερές τις στροφές της γεννήτριας, άρα και τη συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος στα 400 Hz. Η τάση δεν διατηρείται σταθερή από τον μηχανισμό ταχύτητας, αλλά ρυθμίζεται ηλεκτρικά μέσω του συστήματος διέγερσης και της μονάδας ελέγχου της γεννήτριας.

Η λύση υπήρξε εξαιρετικά αποτελεσματική και χρησιμοποιήθηκε επί δεκαετίες. Είχε, όμως, κόστος: αυξημένο βάρος, πολυπλοκότητα, λάδι, φίλτρα, ψύξη, μηχανικές φθορές και σημαντικές απαιτήσεις συντήρησης. Μια IDG που παρουσιάζει σοβαρή δυσλειτουργία μπορεί να αποσυνδεθεί μηχανικά εν πτήσει, αλλά κατά κανόνα δεν μπορεί να επανασυνδεθεί προτού το αεροσκάφος προσγειωθεί και επέμβει το τεχνικό προσωπικό.

Η αεροπορική τεχνολογία άρχισε, λοιπόν, να αναζητεί έναν απλούστερο δρόμο.

Οι γεννήτριες μεταβλητής συχνότητας

Η επόμενη λύση ήταν οι γεννήτριες μεταβλητής συχνότητας, γνωστές ως Variable-Frequency Generators ή VFG.

Οι γεννήτριες αυτές συνδέονται στον κινητήρα χωρίς τον βαρύ υδρομηχανικό μηχανισμό σταθερών στροφών. Καθώς μεταβάλλονται οι στροφές του κινητήρα, μεταβάλλονται αναλόγως και οι στροφές της γεννήτριας. Η τάση μπορεί να ρυθμίζεται ηλεκτρικά, αλλά η συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος ακολουθεί τις στροφές του κινητήρα. Ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους και τη φάση της πτήσης, η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται περίπου από 320 έως 800 Hz. Για παράδειγμα, στο Global Express αναφέρονται τιμές περίπου 324–596 Hz, ενώ σε νεότερα μεγάλα αεροσκάφη το εύρος μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερο.

Το ερώτημα είναι εύλογο: πώς μπορεί αυτό το ρεύμα να τροφοδοτήσει συσκευές που είχαν αρχικά σχεδιαστεί για σταθερή συχνότητα 400 Hz;

Η απάντηση είναι ότι δεν χρειάζονται όλα τα φορτία σταθερή συχνότητα. Οι αντιστάσεις θέρμανσης, πολλά ηλεκτρονικά τροφοδοτικά και αρκετές άλλες καταναλώσεις μπορούν να λειτουργήσουν με μεταβαλλόμενη συχνότητα, εφόσον η τάση παραμένει εντός των προβλεπόμενων ορίων.

Αντίθετα, οι ηλεκτρικοί κινητήρες των οποίων η ταχύτητα ή η ροπή πρέπει να ελέγχονται με ακρίβεια τροφοδοτούνται μέσω τοπικών ηλεκτρονικών ελεγκτών. Οι μονάδες αυτές ανορθώνουν και επανασυνδέουν το ρεύμα, παρέχοντας στον κινητήρα ακριβώς την τάση και τη συχνότητα που χρειάζεται. Έτσι μπορούν να λειτουργούν ηλεκτρικές αντλίες καυσίμου, υδραυλικές αντλίες, συμπιεστές κλιματισμού και άλλοι μηχανισμοί ανεξάρτητα από τη στιγμιαία συχνότητα της κύριας γεννήτριας.

Η λύση αυτή μεταφέρει την πολυπλοκότητα από έναν μεγάλο κεντρικό υδρομηχανικό μηχανισμό σε μικρότερες, κατανεμημένες ηλεκτρονικές μονάδες. Δεν εξαφανίζει τις βλάβες ούτε τη συντήρηση, αλλά καταργεί μεγάλο μέρος των μηχανικών στοιχείων της IDG και προσφέρει καλύτερο έλεγχο, ευκολότερη απομόνωση βλαβών και μεγαλύτερη λειτουργική ευελιξία.

Μία από τις πρώτες σημαντικές εφαρμογές γεννητριών μεταβλητής συχνότητας στην πολιτική αεροπορία ήταν το επιχειρηματικό αεροσκάφος Bombardier Global Express, το ηλεκτρικό σύστημα του οποίου σχεδιάστηκε εξαρχής γύρω από αυτή τη φιλοσοφία. Ακολούθησαν μεγάλα αεροσκάφη όπως τα Airbus A380 και A350 και, σε ακόμη μεγαλύτερη κλίμακα, το Boeing 787.

Μεταβλητές στροφές, σταθερή συχνότητα

Παράλληλα αναπτύχθηκε η τεχνολογία Variable Speed–Constant Frequency, γνωστή ως VSCF: μεταβλητές στροφές, αλλά σταθερή συχνότητα εξόδου. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η

γεννήτρια περιστρέφεται με μεταβαλλόμενες στροφές και παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας. Στη συνέχεια, κυκλώματα ισχύος με ημιαγωγούς μετατρέπουν ηλεκτρονικά την παραγόμενη ενέργεια σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας — συνήθως 115 VAC και 400 Hz.

Η επικρατέστερη μέθοδος είναι η αρχιτεκτονική ενδιάμεσου συνεχούς κυκλώματος, το λεγόμενο DC link. Το μεταβλητής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα της γεννήτριας ανορθώνεται πρώτα σε συνεχές. Στη συνέχεια, ένας ηλεκτρονικός αντιστροφέας — inverter — το μετατρέπει ξανά σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας και ελεγχόμενης τάσης.

Με απλά λόγια: Μεταβλητό AC → συνεχές DC → σταθερό AC 400 Hz.

Συστήματα αυτής της οικογένειας χρησιμοποιήθηκαν στο MD-90 και σε ορισμένες διαμορφώσεις του Boeing 737. Στο Boeing 777, ωστόσο, οι κύριες γεννήτριες είναι συμβατικές IDG, ενώ η τεχνολογία VSCF χρησιμοποιείται στις δύο εφεδρικές γεννήτριες των 20 kVA. Η διάκριση είναι σημαντική: το 777 δεν αποτελεί αεροσκάφος με κύριο σύστημα VSCF.

Οι ηλεκτρονικές μονάδες μετατροπής μπορούν να τοποθετούνται κοντά στη γεννήτρια ή μέσα στην άτρακτο, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του αεροσκάφους. Η εγκατάστασή τους στην άτρακτο διευκολύνει ορισμένες εργασίες συντήρησης και προστατεύει τις μονάδες από το ιδιαίτερα δυσμενές θερμικό και κραδασμικό περιβάλλον του κινητήρα.

Δεν υπάρχει, όμως, «δωρεάν» θερμικό όφελος. Οι απώλειες των μετατροπέων μετατρέπονται σε θερμότητα, η οποία πρέπει να απομακρυνθεί μέσω αέρα, υγρού ψύξης ή άλλου συστήματος θερμικής διαχείρισης. Δεν βοηθά τον κλιματισμό· αντίθετα, προσθέτει θερμικό φορτίο στα ηλεκτρονικά διαμερίσματα.

Από τα 115 στα 230 Volt

Η επόμενη μεγάλη αλλαγή ήταν η αύξηση της τάσης διανομής.

Η παραδοσιακή κύρια ηλεκτρική τάση των μεγάλων αεροσκαφών παρέμενε επί δεκαετίες στα 115/200 VAC. Το Boeing 787 έκανε το μεγάλο βήμα προς κύριο δίκτυο περίπου 230/400 VAC μεταβλητής συχνότητας — περίπου 230 V μεταξύ φάσης και ουδετέρου και 400 V μεταξύ φάσεων.

Η αυξημένη τάση επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος με μικρότερο ρεύμα. Αυτό περιορίζει τη διατομή και το βάρος των καλωδίων, μειώνει τις ωμικές απώλειες και καθιστά εφικτή την τροφοδότηση πολύ ισχυρότερων ηλεκτρικών φορτίων.

Το 787 δεν χρησιμοποιεί μόνο ένα επίπεδο τάσης. Η ηλεκτρική αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει κύρια δίκτυα περίπου 235 VAC μεταβλητής συχνότητας, δίκτυα 115 VAC, συστήματα υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος ±270 VDC και συμβατικά κυκλώματα 28 VDC για επιμέρους λειτουργίες. Η εφαρμογή συστημάτων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, όπως τα 270 VDC, είχε ήδη διερευνηθεί και χρησιμοποιηθεί σε στρατιωτικά αεροσκάφη. Δημιούργησε, όμως, νέες απαιτήσεις προστασίας.

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα η τάση και το ρεύμα διέρχονται περιοδικά από το μηδέν, γεγονός που διευκολύνει τη σβέση ενός ηλεκτρικού τόξου όταν ανοίγει ένας διακόπτης. Στο συνεχές ρεύμα δεν υπάρχει αυτός ο φυσικός μηδενισμός. Το τόξο μπορεί να παραμείνει ενεργό και να προκαλέσει σοβαρές βλάβες.

Γι’ αυτό τα δίκτυα υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος χρειάζονται ειδικά σχεδιασμένους επαφείς, διακόπτες ισχύος, ηλεκτρονικές ασφάλειες, solid-state power controllers, ανίχνευση ηλεκτρικού τόξου, κατάλληλες αποστάσεις μόνωσης και αυστηρό έλεγχο της ακολουθίας σύνδεσης και αποσύνδεσης των φορτίων. Δεν αρκεί απλώς μια μεγαλύτερη κοινή ασφάλεια.

Οι εναλλακτικές πηγές ισχύος

Οι γεννήτριες των κύριων κινητήρων αποτελούν την κανονική πηγή ηλεκτρικής ισχύος κατά την πτήση, αλλά δεν είναι οι μόνες.

Η πρώτη εναλλακτική πηγή είναι η εξωτερική ηλεκτρική τροφοδοσία, το External Power ή Ground Power Unit. Χρησιμοποιείται όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος, ώστε να λειτουργούν τα συστήματά του χωρίς να είναι αναγκαία η λειτουργία των κινητήρων ή της APU.

Η δεύτερη είναι η Βοηθητική Μονάδα Ισχύος, η Auxiliary Power Unit — APU. Πρόκειται για έναν μικρό αεριοστρόβιλο, συνήθως εγκατεστημένο στο πίσω μέρος της ατράκτου. Παρέχει ηλεκτρική ισχύ στο έδαφος, υποστηρίζει την εκκίνηση των κύριων κινητήρων και, ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά την πτήση ως εναλλακτική ή εφεδρική πηγή.

Η τρίτη είναι η ανεμογεννήτρια έκτακτης ανάγκης, η Ram Air Turbine — RAT. Σε περίπτωση απώλειας των κανονικών πηγών ισχύος, η RAT εκτείνεται έξω από την άτρακτο και περιστρέφεται από το σχετικό ρεύμα του αέρα. Ανάλογα με το αεροσκάφος, μπορεί να κινεί απευθείας μια ηλεκτρική γεννήτρια ή να κινεί υδραυλική αντλία, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί τα απαραίτητα συστήματα ή μια γεννήτρια έκτακτης ανάγκης.

Η RAT δεν προορίζεται να επαναφέρει όλες τις ανέσεις και τις πλήρεις λειτουργίες του αεροσκάφους. Σκοπός της είναι να διατηρήσει ενεργές τις απολύτως απαραίτητες καταναλώσεις: βασικά όργανα, συστήματα ελέγχου πτήσης, κρίσιμες επικοινωνίες, ναυτιλιακά βοηθήματα και τον αναγκαίο φωτισμό.

Η τέταρτη πηγή είναι οι συσσωρευτές. Οι μπαταρίες παρέχουν συνεχές ρεύμα για περιορισμένο χρονικό διάστημα στις ουσιώδεις ηλεκτρικές γραμμές. Μέσω στατικού αντιστροφέα μπορούν, όπου απαιτείται, να τροφοδοτήσουν και κρίσιμα φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται επίσης για την αρχική ενεργοποίηση των συστημάτων, τη λειτουργία των κυκλωμάτων ελέγχου και, ανάλογα με τη σχεδίαση, την εκκίνηση της APU ή άλλων μονάδων. Δεν πρέπει, όμως, να γενικεύουμε ότι οι μπαταρίες εκκινούν απευθείας τους μεγάλους αεριοστροβίλους όλων των πολιτικών αεροσκαφών. Στα περισσότερα συμβατικά αεροσκάφη η εκκίνηση των κύριων κινητήρων γίνεται πνευματικά, ενώ σε νεότερες αρχιτεκτονικές, όπως εκείνη του 787, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές γεννήτριες-εκκινητές.

Ολόκληρη η φιλοσοφία στηρίζεται στην εφεδρικότητα: η απώλειας μιας γεννήτριας αναλαμβάνεται αυτόματα από τις υπόλοιπες, μέσω αναδιάταξης των ηλεκτρικών διαύλων, ώστε τα κρίσιμα φορτία να παραμένουν πάντοτε τροφοδοτούμενα.

Το «περισσότερο ηλεκτρικό» αεροσκάφος

Η γενικότερη κατεύθυνση της αεροπορικής τεχνολογίας ονομάζεται More Electric Aircraft — MEA, δηλαδή «περισσότερο ηλεκτρικό αεροσκάφος».

Ο όρος δεν σημαίνει κατ’ ανάγκην ότι οι κινητήρες πρόωσης είναι ηλεκτρικοί. Σημαίνει ότι λειτουργίες οι οποίες στο παρελθόν εξυπηρετούνταν πνευματικά, υδραυλικά ή μηχανικά μετατρέπονται σταδιακά σε ηλεκτρικές.

Στο Boeing 787, για παράδειγμα, οι συμβατικές πνευματικές απολήψεις αέρα από τους κινητήρες έχουν περιοριστεί δραστικά. Ο κλιματισμός και η συμπίεση της καμπίνας πραγματοποιούνται από ηλεκτροκίνητους συμπιεστές, ενώ ακόμη και η εκκίνηση των κινητήρων γίνεται ηλεκτρικά. Αυτό μειώνει τις σωληνώσεις θερμού αέρα, επιτρέπει ακριβέστερο έλεγχο των φορτίων και μετατρέπει το ηλεκτρικό σύστημα σε βασικό πυρήνα της συνολικής αρχιτεκτονικής του αεροσκάφους.

Η εξέλιξη αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά δεν είναι δωρεάν. Απαιτεί ισχυρότερες γεννήτριες, μετατροπείς μεγάλης ισχύος, προηγμένη ψύξη, αυστηρότερη ηλεκτρική

προστασία, νέες διαδικασίες συντήρησης και ιδιαίτερη μέριμνα για ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, υπερθερμάνσεις και ηλεκτρικά τόξα.

Το υβριδικό ή πλήρως ηλεκτρικό αεροσκάφος αποτελεί ένα ακόμη, διαφορετικό τεχνολογικό βήμα. Εκεί δεν «ηλεκτροποιούντα»ι μόνο τα βοηθητικά συστήματα, αλλά και η ίδια η πρόωση. Για μικρά αεροσκάφη και περιορισμένες αποστάσεις η εξέλιξη έχει ήδη αρχίσει. Για μεγάλα επιβατικά αεροσκάφη, όμως, εξακολουθούν να υπάρχουν σοβαρότατα εμπόδια: η ειδική ενέργεια των συσσωρευτών, το βάρος, η απομάκρυνση της θερμότητας, η πυρασφάλεια, η αξιοπιστία και, φυσικά, η πιστοποίηση.

Η πορεία, πάντως, είναι σαφής: από τις γεννήτριες των 28 VDC περάσαμε στα 115 VAC και 400 Hz, από τις IDG στις γεννήτριες μεταβλητής συχνότητας, από τα λίγα δεκάδες kVA στο ένα και πλέον MVA και από τα μηχανικά και πνευματικά συστήματα στην ολοένα μεγαλύτερη ηλεκτροποίηση.

Τελικά, μου φαίνεται ότι αυτοί οι ηλεκτρολόγοι και οι ηλεκτρονικοί δεν θα ησυχάσουν μέχρι να αντικαταστήσουν κάθε σωλήνα, αντλία, βαλβίδα και μηχανικό σύνδεσμο του αεροπλάνου.

Μόνο τα φτερά ας μας αφήσουν.

Αν και, με τον ρυθμό που εξελίσσονται τα πράγματα, ούτε γι’ αυτά είμαι απολύτως βέβαιος!

Υ.Γ.

Αρκετά ζητήματα έμειναν σκόπιμα εκτός, για να μη χαθεί η ροή: Όπως τα πρότυπα που ορίζουν τα όρια τάσης και συχνότητας (MIL-STD-704 για τα στρατιωτικά, οι αντίστοιχες πολιτικές προδιαγραφές), η επίδραση της ηλεκτρικής αρχιτεκτονικής στην πιστοποίηση ETOPS των δικινητηρίων, καθώς και οι εντυπωσιακές ηλεκτρικές απαιτήσεις των σύγχρονων μαχητικών, όπως το F-35. Θα επιχειρήσω να τα καλύψω σε επόμενο άρθρο — μαζί με τις αντίστοιχες σοβιετικές σχολές σχεδίασης, που ακολούθησαν συχνά τον δικό τους δρόμο, και με τον ολοένα διευρυνόμενο κόσμο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, όπου το ηλεκτρικό σύστημα παύει να είναι βοηθητικό και γίνεται η ίδια η καρδιά της πλατφόρμας και φυσικά το παρόν και το μέλλον των ηλεκτροκίνητων αεροσκαφών.

Βασική επιστημονική και τεχνική βιβλιογραφία

1. **Madonna, V., Giangrande, P. and Galea, M., “Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges and Opportunities.”**
   Από τις καλύτερες επιστημονικές ανασκοπήσεις για την ιστορική εξέλιξη των aircraft generators, τα DC και AC δίκτυα, τις IDG, VSCF και variable-frequency architectures.

2. **Barzkar, A. and Ghassemi, M., “Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review,” IEEE Access, 2020.**
   Πλήρης επισκόπηση AC/DC αρχιτεκτονικών, voltage levels, B787, MEA, AEA και ηλεκτρικής πρόωσης.

3. **Zhao, X., Guerrero, J. M. and Wu, X., “Review of Aircraft Electric Power Systems and Architectures,” IEEE ENERGYCON, 2014.**
   Χρήσιμη για συγκριτική παρουσίαση 115/200 VAC, 230/400 VAC, 270 VDC, variable-frequency buses και distributed power systems.

4. **Sarlioglu, B. and Morris, C. T., “More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015.**
   Κλασική εργασία για MEA, electric actuation, power electronics, electric taxi και ηλεκτροποιημένες βοηθητικές λειτουργίες.

5. **Rahrovi, B. and Ehsani, M., “A Review of the More Electric Aircraft Power Electronics,” IEEE, 2019.**

Εστιάζει στους converters, rectifiers, inverters, motor controllers και στις AC/DC αρχιτεκτονικές.

6. **Ni, K. et al., "Electrical and Electronic Technologies in More-Electric Aircraft: A Review," IEEE Access, 2019.**
   Κατάλληλη πηγή για ηλεκτρονικά ισχύος, ηλεκτρικές μηχανές, προστασία, thermal management και κατανεμημένα συστήματα.

7. **Kankam, M. D. et al., "A Survey of Power Electronics Applications in Aerospace Technologies," NASA.**
   Χρήσιμη ιστορική και τεχνολογική σύνδεση μεταξύ αεροπορικών ηλεκτρικών συστημάτων και power electronics.

8. **Hansen, I. G. and Kenny, B. H., "Specification and Testing for Power-by-Wire Aircraft," NASA Lewis Research Center.**
   Πρώιμη αλλά θεμελιώδης εργασία για το *Power-by-Wire* και το More Electric Aircraft.

9. **Available Aircraft Flight and Technical Manuals**