

Električne mreže zrakoplova

Općenita struktura električne mreže zrakoplova:

- › U pravilu svaki zrakoplov ima sljedeće izvore električne energije:
 - **Po jedan generator** (AC ili DC) **na svakom motoru** (vrlo rijetke iznimke, ali postoje)
 - To su glavni izvori električne energije (u letu)
 - Od nekoliko desetaka (40, 60) pa do više stotina (150, 250) kVA po generatoru
 - **Pomoćni motor sa generatorom** (APU – *Auxiliary Power Unit*)
 - Postoji u pravilu samo na većim zrakoplovima
 - Izvor AC struje stabilne frekvencije (jer se motor vrti konstantnom brzinom)
 - Zato se nekad koristi posebno za uređaje i sustave koji su jako osjetljivi na varijacije u frekvenciji struje
 - Postaje glavno napajanje u slučaju kvara glavnih generatora odnosno motora
 - **Vjetroturbina** (RAT – *Ram Air Turbine*)
 - Postoji za krajnji slučaj nužde, u slučaju gubitka svih drugih izvora električne energije
 - U pravilu na većim zrakoplovima i na vojnim zrakoplovima
 - U normalnim okolnostima je uvučena u tijelo zrakoplova, ne vidi se i ne radi
 - Može imati sustave za osiguravanje konstantne brzine rotacije, npr. elisu sa promjenjivim napadnim kutom krakova
 - **Akumulator**
 - Jedini izvor struje koji ne ovisi o tome da zrakoplov leti ili da motori rade
 - Kod manjih zrakoplova nužan za pokretanje motora (kad nema EPU/GPU)
 - Konstantno je spojen na sve kritične sustave (*hot battery bus*)
 - Omogućava gladak prijelaz sa generatora na RAT kao izvor struje u slučaju nužde
 - Omogućava neprekidan i stabilan rad svih ključnih sustava u slučaju bilo kakvih naglih promjena ili poremećaja u električnom sustavu zrakoplova tijekom leta
 - Postaje glavno (jedino) napajanje u slučaju kvara svih drugih izvora struje u letu
 - Nemoguće održavanje leta, nedovoljni kapacitet (do nekoliko kWh sve skupa)
 - **Vanjsko napajanje** (EPU ili GPU – *External / Ground Power Unit*)
 - Priključak na trupu, napaja sustave kada avion ne leti i motori ne rade

- › Svaki zrakoplov također ima i više sabirnica¹:
 - U pravilu svaki generator napaja posebnu sabirnicu (*split bus systems*) iako postoje i sustavi u kojima više generatora napaja istu sabirnicu (*parallel bus systems*)
 - Uvijek postoje barem po jedna odvojena AC i DC sabirnica (a najčešće više njih za različite potrebe), napajane iz različitih izvora (preko TRU i invertera)
 - Uvijek postoji zasebna „vruća“ akumulatorska sabirnica (*hot battery bus*) koja je konstantno pod naponom od akumulatora (kritični sustavi itd.)
 - Akumulator može po potrebi napajati i druge sabirnice, ali ovu napaja uvijek i stalno
- › Distribucija električne energije kontrolirana je od strane sabirničke kontrolne jedinice (**BPCU – Bus Power Control Unit**)
 - Radi u suradnji sa generatorskim kontrolnim jedinicama (GCU)
 - Nadgleda i šalje u kokpit parametre svih sabirnica, npr. jačinu struje i opterećenje (koristeći strujne transformatore kao senzore)
 - Automatski upravlja i omogućava ručno upravljanje sabirnicama
 - Spajanje i odspajanje preko releja, solenoida i kontaktora

DC električne mreže zrakoplova:

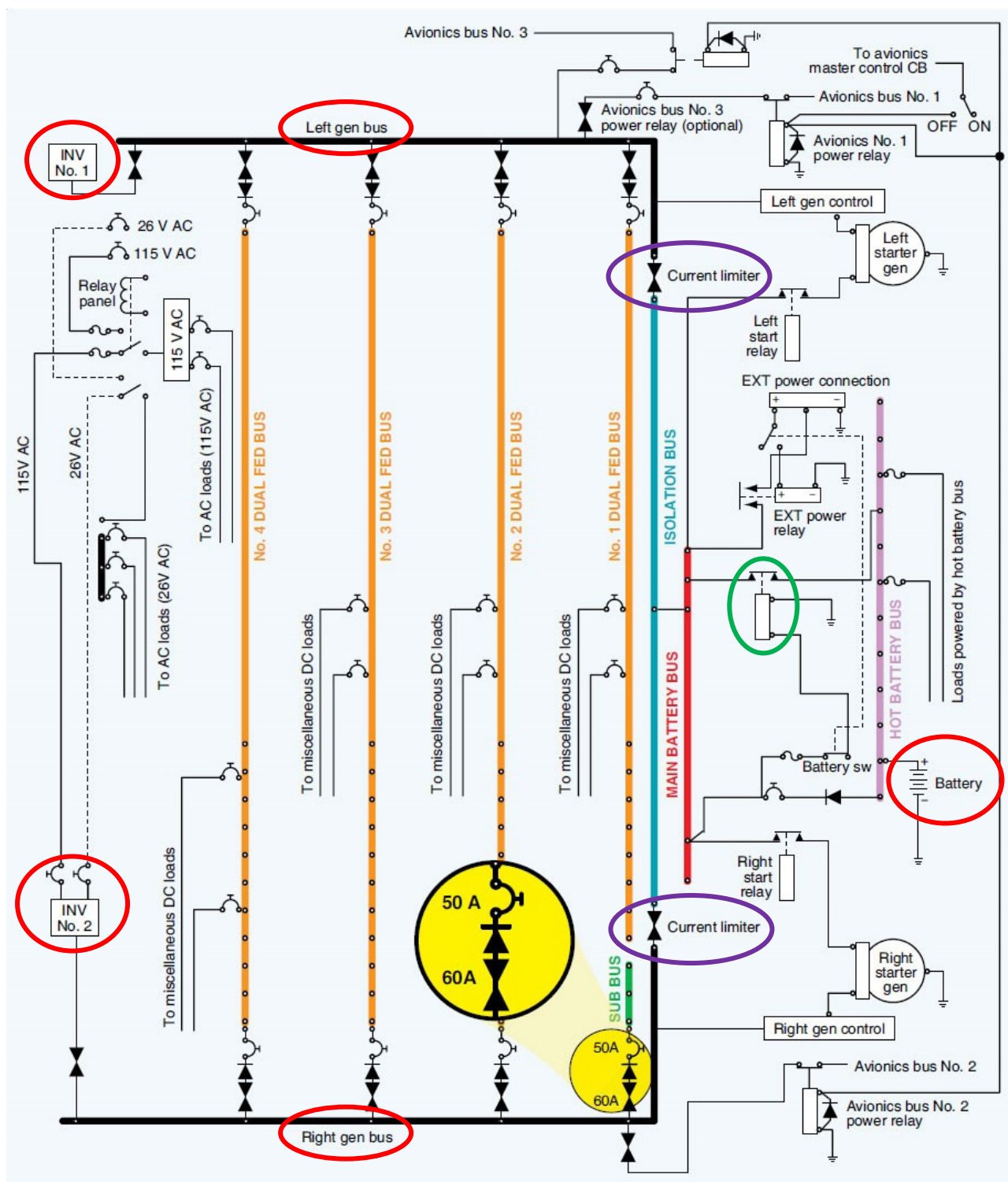
- › Glavni generatori proizvode DC struju, odnosno glavne sabirnice su DC:
 - Stariji zrakoplovi su imali DC generatore sa četkicama – toga gotovo više nema
 - Noviji zrakoplovi koriste DC alternatore (to su brushless AC alternatori sa ispravljačem)
 - Najefikasnija kombinacija, jer su to najbolji generatori, a CSDU nije potreban
 - Često su to **starter-generatori**, dakle koriste se kao elektromotori za pokretanje glavnih motora (preko akumulatora ili vanjskog napajanja), a potom kao generatori na tim istim motorima koje su pokrenuli
 - Napon koji se najčešće koristi je 28 V (kompatibilno sa akumulatorima)
- › **Prednosti DC mreže:**
 - Samo napon je parametar (nema frekvencije) pa se puno lakše i jednostavnije regulira
 - nema potrebe za CSDU-ovima (a to su teški i komplicirani i skupi uređaji)
 - nema potrebe za usklađivanjem frekvencija od više generatora, lako se sve spaja na istu sabirnicu

¹ Sabirnica (*engl. bus*) je ono čime „teče“ odnosno kuda prolazi ono nešto što promatramo, kao glavna cesta nekog grada. U našem slučaju sabirnice su glavni vodovi (velikog presjeka, koji mogu podnijeti najveće struje) na koje su spojeni neki izvori i neka trošila i koje se mogu promatrati kao zaseban „dio“ električne mreže.

- Većina kritičnih potrošača i sustava potrebnih za let i normalan rad zrakoplova su DC
- Izravna kompatibilnost sa akumulatorom kao izvorom električne energije
- › **Nedostatci DC mreže:**
 - Potrebni su inverteri za sve AC potrošače
 - Prije je to bio veći problem zbog mnogih problema mehaničkih, rotacijskih invertera
 - Danas to nije toliki problem jer su elektronički, statički inverteri lagani i efikasni
 - Ipak, skupi su i kompleksni uređaji, pogotovo za velike snage (ograničenja)
 - Teško je promijeniti/prilagoditi iznos napona (ne postoji jednostavni DC transformator)
- › U osnovi su DC mreže bolje zbog svoje jednostavnosti, ako nema previše AC potrošača
 - Često se mogu pronaći kod manjih zrakoplova, dakle u civilnoj avijaciji
 - Moderni, lagani zrakoplovi sa klipnim motorima
 - Mali „korporativni“ i „commuter“ mlažnjaci (jedan ili dva motora)
- › Detaljna analiza primjera sa slike 1 (ispod):
 - Skroz desno nalazi se „**vruća**“ **akumulatorska sabirnica** (roza debela linija, piše „*HOT BATTERY BUS*“) koja je stalno pod naponom od akumulatora (u crvenom krugu, piše „*Battery*“)
 - Lijevo od nje nalazi se **glavna akumulatorska sabirnica** (debela crvena linija, piše „*MAIN BATTERY BUS*“) čije glavne funkcije su dovodenje struje za paljenje motora i povezivanje akumulatora sa ostatkom zrakoplova
 - Ona se na „vruću“ sabirnicu, dakle na akumulator, spaja preko solenoida² (ovo u zelenom krugu), koji je napajan akumulatorom i kojime se može upravljati iz kokpita (ovo što piše „*Battery sw*“, a to je skraćeno od *Battery switch*, dakle prekidač za akumulator)
 - Na tu sabirnicu spojeni su preko solenoida (piše „*Left/Right start relay*“) starter-generatori za motore (piše „*Left/Right starter gen*“)
 - Na tu se sabirnicu dovodi i vanjski izvor struje (piše „*EXT power connection*“), koji se onda može iskoristiti za npr. paljenje motora
 - Ona je spojena na **izolacijsku sabirnicu** (debela tirkizna linija, piše „*ISOLATION BUS*“) koja služi samo za izoliranje generatorskih sabirnica od akumulatorske kako ju eventualna prevelika struja od generatora (u slučaju neke greške poput kratkog spoja) ne bi spalila

² **Solenoid** je malo robusnija verzija **releja**, a to je u osnovi strujom-upravljeni prekidač (postoji još **kontaktor**). Dakle, oni se mogu na daljinu „uključiti“ ili „isključiti“ kako bi prekinuli ili spojili strujni krug.

- To se postiže pomoću posebnih osigurača koji prekidaju krug u slučaju prevelika struje (ljubičasti krugovi, piše „Current limiter“, to im je standardna oznaka)



Slika 1 - Dijagram split-bus električne mreže manjeg zrakoplova sa dva turboprop motora

- **Dvije glavne generatorske sabirnice** (debele crne linije, piše „Left/Right gen bus“, zaokruženo crveno na dnu i vrhu slike) napajaju sve ostalo:
 - Na svaku od njih je spojen samo jedan generator (tzv. sustav razdvojenih sabirnica, *split bus system*) preko GCU-a (piše „Left/Right gen control“)

- Svaka napaja po jedan statički inverter (crveni krugovi skroz lijevo, piše „INV No.1/2“) koji stvaraju dvije vrste AC struje – 26V i 115V trofaznu struju frekvencije 400 Hz – i spojeni su preko releja na dvije AC sabirnice za AC potrošače (jedna za 26V, druga za 115V)
- Također svaka od glavnih sabirnica zasebno napaja posebne sabirnice za avioniku (na slici gore i dolje i skroz desno)
- U sredini se nalaze četiri **dvojno napajane centralne sabirnice** (debele narančaste linije, piše „No. 1/2/3/4 DUAL FED BUS“) na koje su spojeni svi ostali DC potrošači u zrakoplovu (piše „To miscellaneous DC loads“ što znači „Prema raznim DC trošilima“)
- Te sabirnice spojene su paralelno na obje generatorske sabirnice kako bi svaki od generatora mogao napajati sve sustave ako je potrebno (recimo u slučaju kvara jednog generatora)
- Spojene su preko 3 elementa (veliki povećani žuti krug u sredini dolje):
 - 1) Prvi znak je za elektronički osigurač na 50 A, koji se može resetirati iz kokpita
 - 2) Drugi znak je dioda koja onemogućava tok struje u krivom smjeru, dakle da se ne može dogoditi da jedan generator napaja drugi generator, odnosno da struja teče prema nekom od generatora i čini ga potrošačem umjesto izvorom
 - 3) Treći znak je limitator struje na 60 A koji sprječava nastajanje štete u slučaju da se elektronički osigurač pokvari; ako on pregori mora ga se zamijeniti ručno na zemlji
- Takav dizajn omogućuje najbolje balansiranje opterećenja generatora, dakle idealnu podjelu opterećenja, pogotovo jer se prilikom dizajna električne mreže pazi da na svakoj od tih centralnih sabirnica bude podjednako opterećenje (raspoređivanje potrošača)

AC električne mreže zrakoplova:

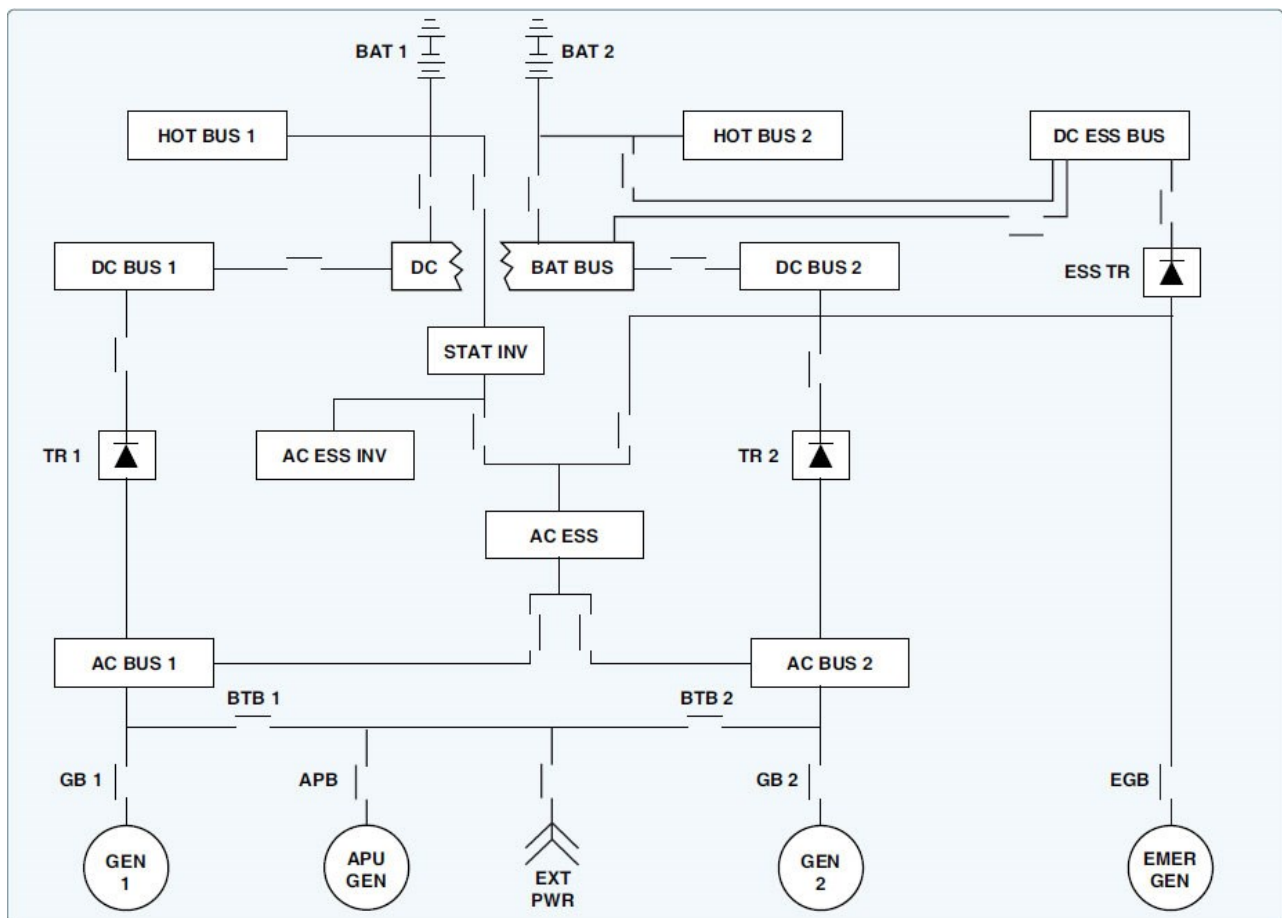
- › Glavni generatori proizvode AC struju, odnosno glavne sabirnice su AC:
 - Koriste se brushless alternatori jer su najefikasniji i najpouzdaniji, puno veću snagu po jedinici mase i volumena stvaraju od starih DC generatora
 - Standard je trofazna 115/200 V @ 400 Hz struja³
- › **Prednosti AC mreže:**
 - Nisu potrebni inverteri
 - Nekad je to bio veći problem, danas sa statičkim inverterima je manji
 - Svejedno, kada je većina potrošnje AC onda ima više smisla ne pretvarati u DC i nazad
 - Jednostavna i efikasna transformacija u koji god napon i ispravljanje u DC (TRU)

³ To znači da je frekvencija 400 Hz i da su fazni naponi 115 V, a linijski (dakle između dvije faze) $115 \cdot \sqrt{3} \approx 200$ V

- Visoka frekvencija od 400 Hz (gradska mreža na zemlji je 50 Hz) dodatno pomaže u efikasnosti transformacije (manji gubici i manje veličine transformatora) i ispravljanja
- Posebne, dodatne prednosti trofazne struje:
 - Idealno za pokretanje elektromotora, pogotovo zbog visoke frekvencije
 - Dvije vrijednosti napona (fazna i linijska), tri faze i još efikasnije ispravljanje u DC
- › **Nedostatci AC mreže:**
 - Frekvencija i faza kao parametri:
 - Mnogi uređaji zahtijevaju točno određenu frekvenciju struje → potrebno je osigurati struju konstantne frekvencije, a to zahtijeva:
 - 1) ili CSD uređaje vezane uz generator (odnosno IDG-ove u moderno doba), a oni sa sobom nose razne mane koje smo ranije obradili (masivni, komplicirani, kvarljivi, ...),
 - 2) ili AC/AC pretvarače koji primaju struje raznih frekvencija, a na izlazu daju struju stabilne, točno određene frekvencije; oni su nešto kao statički inverteri, vrlo slični elektronički uređaji sa sličnim problemima i ograničenjima.
 - Struje više generatora ne mogu se jednostavno miješati na istim sabirnicama⁴ pa se mora:
 - 1) ili napraviti (komplicirani) sustav prilagodbe i sinkronizacije frekvencija i faza kako bi više generatora moglo istovremeno davati struju na istu sabirnicu (*parallel bus system*),
 - 2) ili imati odvojene sabirnice za svaki generator, pri čemu je balansiranje opterećenja problem i treba se na njega jako paziti prilikom dizajniranja zrakoplova kada se odlučuje što će biti spojeno na koju sabirnicu
 - Reaktivna snaga:
 - Treba paziti kod opterećenja kakve je vrste to opterećenje i balansirati s obzirom na faktor snage kako generatori ne bi bili preopterećeni i trošila se energija na jalovu snagu
- › Ukratko, AC mreže su kompliciranije, ali AC struja se lakše generira, prenosi i s njome manipulira pa su AC mreže uobičajene ako su potrebe za električnom energijom velike, a pogotovo ako su one uglavnom za AC potrošače
 - U pravilu svi veliki zrakoplovi (putnički, teretni itd.) i također vojni zrakoplovi
- › Postoje tri osnovna načina organizacije AC električne mreže zrakoplova:
 - 1) Sustav razdvojenih sabirnica (*Split Bus System*)
 - Svaki generator napaja svoju sabirnicu → nema potrebe za usklađivanjem faza

⁴ AC struje se ne zbrajaju jednostavno kao DC, moraju biti i iste frekvencije i iste faze da bi se efektivno zbrojile

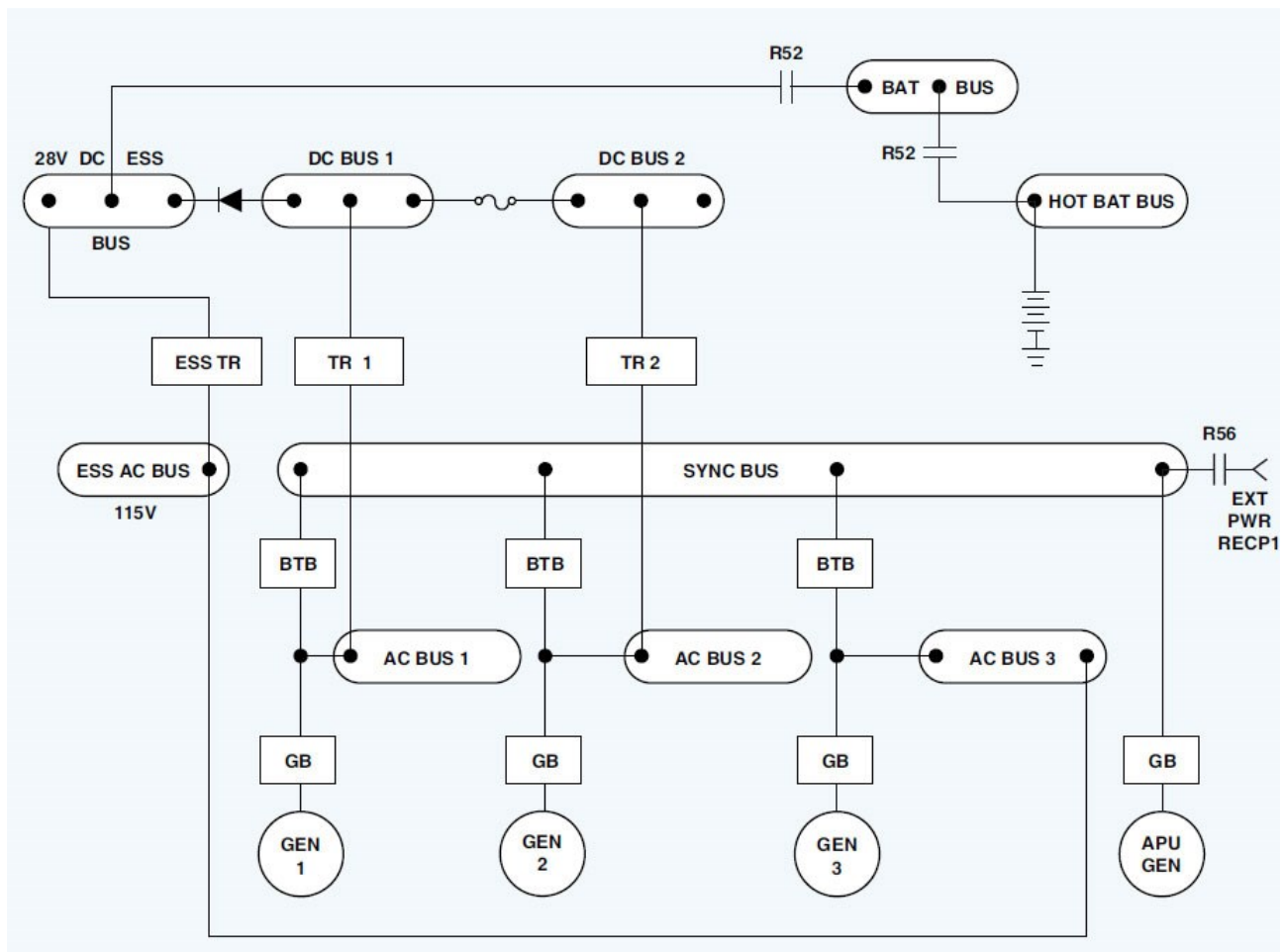
- Može jedan generator napajati i više sabirnica, ali nikada istovremeno s drugim generatorom (npr. u slučaju kvara jednog generatora, drugi – najčešće onaj od APU – preuzima njegovu sabirnicu)
- Jednostavniji sustav, za izradu i upravljanje, ali problematičniji u slučaju kvara
- Uobičajen za moderne zrakoplove sa 2 motora (npr. B737, B757, B777, A300, A320, A310), ali i kod zrakoplova koji nemaju IDG, odnosno CSD jedinice, nego koriste izravno generiranu struju (kakve god frekvencije) sa VSCF tehnologijom ili uz AC/AC konvertere (npr. B787 i A380)
- Takvi zrakoplovi imaju barem jedan, a često i više APU-a



Slika 2 - Primjer sheme sustava razdvojenih AC sabirnica

2) Paralelni sustav sabirnica (Parallel Bus System)

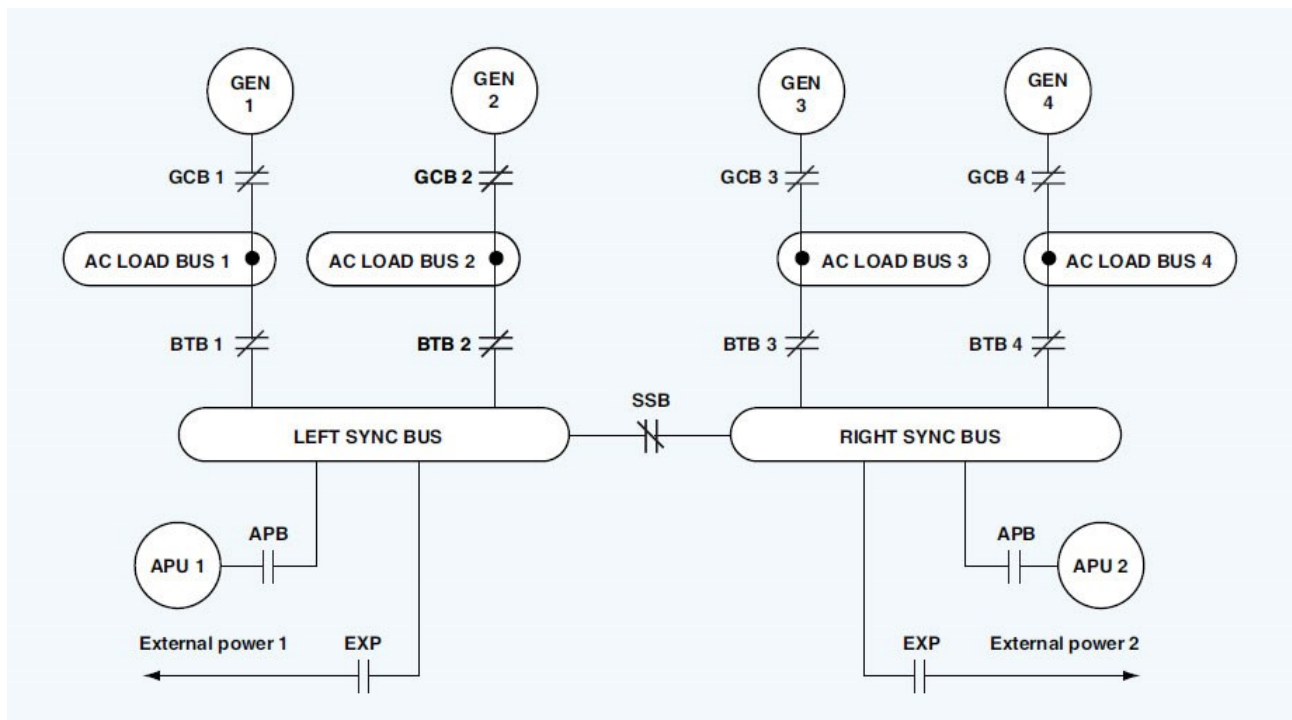
- Svi generatori spojeni su na istu sabirnicu → potrebna je regulacija i sinkronizacija faza
- Bolje balansiranje opterećenja, pogotovo u slučaju kvara generatora ili slične nezgode
- Nježnije preuzimanje opterećenja u slučaju kvara nekoga generatora
- To su u pravilu manje automatizirani i kompliciraniji sustavi, primjeri su Boeing 727 i ranije verzije Boeing 747 zrakoplova



Slika 3 - Primjer sheme paralelnog sustava sabirnica

3) Razdvojeno-paralelni sustav sabirnica (*Split Parallel Bus System*)

- Najbolje od obaju svjetova
- Postoje dvije razdvojene sabirnice (lijeva i desna) koje su paralelnog tipa za generatore spojene na njih (npr. svi lijevi generatori i svi desni generatori)
- Te dvije sabirnice mogu i međusobno biti spojene i uskladiti se, ali se mogu i razdvojiti se pa tako raditi
- Primjer takvog sustava je na Boeing 747-400 zrakoplovima
 - U normalnim uvjetima radi kao potpuno paralelni sustav, a kao razdvojeni samo u iznimnim slučajevima (neki kvarovi) i kada je spojen na vanjsko napajanje



Slika 4 - Primjer sheme razdvojeno-paralelnog sustava sabirnica