

航空機装備品の電氣化 (MEA) の動向

1. はじめに

長年にわたり、航空機装備品の電氣化 (More Electric Aircraft : MEA) は航空機メーカーにとって一つの大きな目標であった。主な理由は、民間機分野では機体重量の軽減による燃料効率の向上を図ることによって、運航コストの削減が可能となることであり、軍用機分野では戦闘時の機体の脆弱性 (被弾による油圧配管の破損等) を減少させるとともに、機体内部の空間をより多くの武器や防御の為のアビオニクスに提供することが可能となることである。MEA は電氣部品能力不足などにより実現が困難であったが、近年の技術革新によって A380 (エアバス社) 及び 787 (ボーイング社) などですぐに実現された。

本稿では、MEA の概要と利点、A380 及び 787 の実例、航空機の各部位における MEA の実例と動向を述べる。

2. MEA の概要と利点

2. 1 MEA の概要

航空機が飛行するためには多くの機器が関わっている。一番重要なのはエンジンであるが、エンジンは空を飛ぶための推力の発生源として使われているだけではない。航空機が飛行するためには、機体制御、航法装置、機内空調などが必要であり、エンジンはこれらの機材の動力源にもなっている。一般的な航空機では、次の 3 つの動力源を使用している。動力系統の概念を図 1 に示す。

- ・電氣: エンジンの軸力によって駆動される発電機 (ジェネレータ) で発電された電気が、機体の電氣系統 (航法装置 (アビオニクス) などを含む) に供給される。
- ・油圧: エンジンの軸力によって駆動される油圧ポンプで作られた油圧が、舵面アクチュエータ、脚アクチュエータなどの駆動部に供給される。
- ・エンジン抽気: エンジン・コンプレッサから取り出された高圧空気が、空調システム、主翼やエンジン入り口の防氷装置などに供給される。;

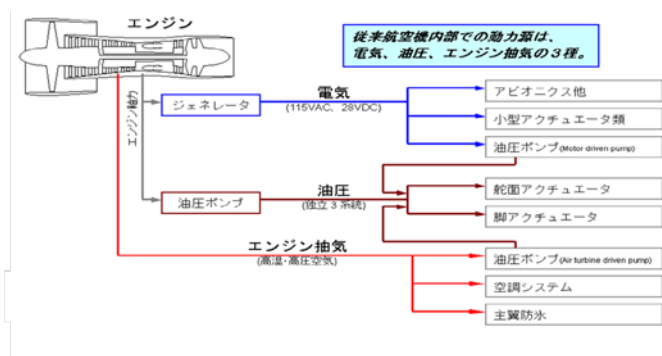


図 1 一般的な航空機の動力系統

MEA とは、油圧及びエンジン抽気を利用している部分を電氣に置き換えることである。航空機設計関係者の間で MEA の推進について検討され始めてから 20 年以上になる。しかし、実用化に向けての技術開発はなかなか進まず、A380 及び 787 でやっと取り入れられた程度である。これには主に 2 つの理由が挙げられる。一つは MEA を支える電氣部品 (発

電機、電力調整器、モーターなど)に適したものが無く、従来の部品は性能が低く、形状が大きく、重く、熱を大量に発生していたため航空機での使用には耐えない物であったためである。二つ目は航空機の安全性確保(耐空証明)の問題である。航空機は安全を確保するために、一定の基準に従って設計・製造がおこなわれる。舵面を制御している油圧のシステムは数十年の実績があり、多くの教訓によって改善されているが、電気によって舵面を制御する手法は安全性の面から実績が不足していると考えられていた。

しかし、発電機、電力制御器、モーターは、電気自動車の普及に見られるように、企業の開発努力により、寸法、重量、性能が容認できるまでになったため、航空機メーカーは新型機に MEA を取り入れ始めた。また、安全性についても、航空機メーカーが多くの実験等を行うとともに、定量的なデータを集積することにより安全性の確保に向けて尽力した結果、航空当局の認識が変化していった。

2. 2 電気化の利点

MEA 技術が民間機に取り入れられる際の最も重要な要件は経済性と安全性の 2 点である。航空機産業界では決して、その技術が完成したという理由だけで採用する訳ではない。MEA は運航費や整備費を節減し安全性の向上をもたらすことができると考えられて採用された。以降に、運航性能(燃費)、整備性及び安全性の向上について記述する。

2. 2. 1 運航性能(燃費)の向上

MEA の採用により、必要な動力の削減及び機体重量の軽減が実現し、結果として消費燃料を削減する。通常機の航行中に非推進動力に使われる燃料は、エンジン全出力の約 10% である。これを完全に電気システムで作動させれば、電気システムの効率の方が遥かに高いために燃料の消費を抑制できる。

また、MEA は分散的な方式を採るため、油圧制御用の作動油配管、抽気エアの配管、熱交換機などが不要となり、その分の機体重量を削減することができる。一例として、A380 が電気油圧式アクチュエータを採用したことによる軽量化は約 1,000 ポンド(約 450 kg) である。

2. 2. 2 整備性の向上

通常機の整備において、空気圧と油圧システムは整備に最も手の掛かる場所である。空気や油の漏れは、場所を特定するのが非常に難しく、多くの時間を費やさなければならぬからである。また、配管の接続部分は外力による変形などによって外れる可能性があり、定期的な点検が必要となっている。しかし、MEA による最新の電気システムはこのような整備を必要としないので整備は簡便化される。

さらに整備性での利点は、運転中でも連続的に自己診断(埋め込まれたテスト機能 built-in test—BIT)を行うことが可能なことである。最新の電気システムではこの機能を利用してシステムの作動状態を常に監視している。実際の故障が起る前に何らかの異常を検出すれば、診断システムがパイロットや整備士に警報を送ることができる。この診断機能は航空機が地上で待機している間でも、特定の破損し易い部品の問題点を抽出できるので修理作業を単純化し迅速化することができる。電気式モジュールで丸ごと交換できるよ

うにすれば修理はさらに単純化される。

2. 2. 3 安全性の向上

前述のように、MEA は分散システムの設計を可能にする（反対に通常機では集中システムを採っている）。この分散システムによって、一般に容積・重量のきびしく制限された機体でも故障に対する冗長性を十分に採れる設計が可能になった。さらに言えば、前述の自己診断機能や正常作動監視機能も MEA の安全性を強調できる一面である。

3. 新型機 (A380、787) の事例

3. 1 A380 の事例

ごく限られた範囲ではあるが、A380 が、MEA を採用した最初の旅客機である。A380 の画期的なところは、航空機の油圧系統は安全法規の規定により 3 系統設置することになっているが、EHA (Electro-Hydrostatic Actuator : 電気油圧式アクチュエータ) と EBHA (Electrical Back-up Hydraulic Actuator : バックアップ式 EHA) の採用により、2 系統にしたことである。A380 の動力系統を図 1 と同様に表現すると図 2 となる。

A380 は EHA を至る所に取り入れている。A320 等では、「YELLOW」、「GREEN」、「BLUE」と呼ばれる 3 系統の油圧系統が用いられていた(3H 方式)。A380 では「BLUE」系統を排除し、EHA や EBHA などの電気を動力源とするアクチュエータを用いることで、従来機と同等の冗長性を確保している (2H+2E 方式)。すなわち、エンジン駆動の油圧ポンプで圧力を維持する 2 系統の集中油圧システム (EBHA と兼用) と 2 系統の EHA システム (図 3 の E1 と E2) から成り立っている。

A380 (舵面) の油圧系統を図 3 に示す。

さらに A380 は電気式の逆推力装置と EHA ブレーキを取り入れるとともに、機内に必要な電力を供給するための最新式の可変周波数発電機を活用している。

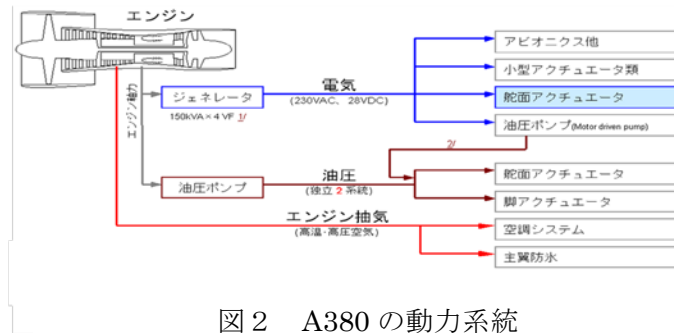


図 2 A380 の動力系統

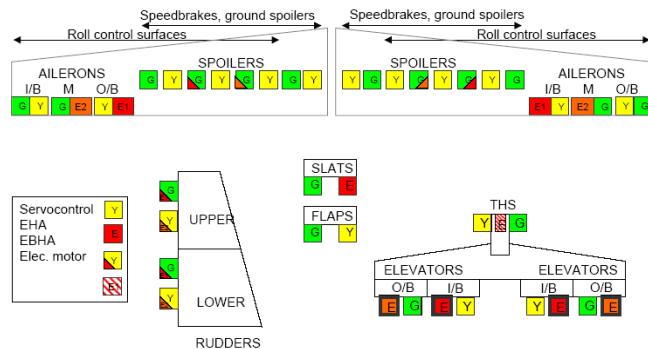


図 3 A380 (舵面) の油圧系統¹⁾

3. 2 787 の事例

787 は MEA を A380 より大胆に取り入れているが、A380 のように EHA を大々的に採用してはいない。主な MEA 項目は次のとおりである。

- ・翼の防除氷装置を抽気エア式から電気式に変えた。
- ・通常の抽気エア方式を使った客室空調システム（暖房、空調、与圧）を電気式に完全に置き換えた。（エンジン入り口の防除氷装置だけは抽気エア方式が残った。）
- ・空気式エンジン始動装置は電気式始動装置に代わった。このためエンジン毎に発電機と始動装置が別々に付いていたのが 1 台にまとまるようになった。
- ・車輪用ブレーキの作動は完全な電気式である電気機械式アクチュエータに代わった。

787 の動力システムを図 1 と同様に表現すると図 4 となる。

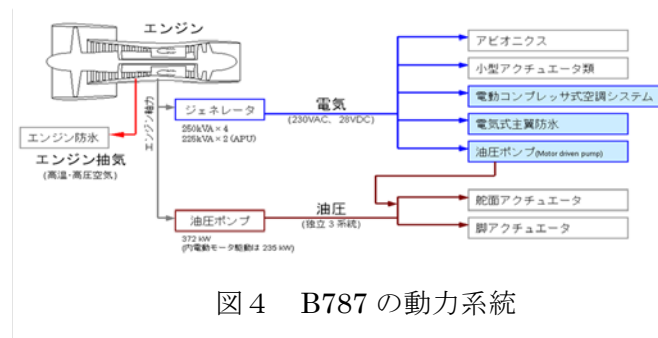


図 4 B787 の動力系統

MEA の採用で搭載される電動システム数が増えるにつれて、必要な電力は増加する。MEA システムは従来のシステムよりもかなり大きな電力を消費するので、十分な出力と効率を持つ発電機が存在しないことが、最初に解決すべき問題の一つであった。しかし 250kVA の発電機が実用化されて、この問題は解決された。787 では、250 k VA の発電機 4 台、225kVA の発電機 2 台によって、合計 1,450kVA の電力（767 の 5 倍）を供給している。高出力を、効率的、信頼度高くしかも小型の装置で発電する技術は近年目覚ましく発展し MEA の実現を可能にしている。この分野で最も重要な進歩は、可変周波数発電機（A380 と 787 に使用）とこれに付随して高出力の電流変換器、電力調整器や配電装置を可能にした電力制御素子である。787 の電源システムを図 5 に示す。787 では大容量発電機の実現により、多くの部分が電気に置き換わっている。

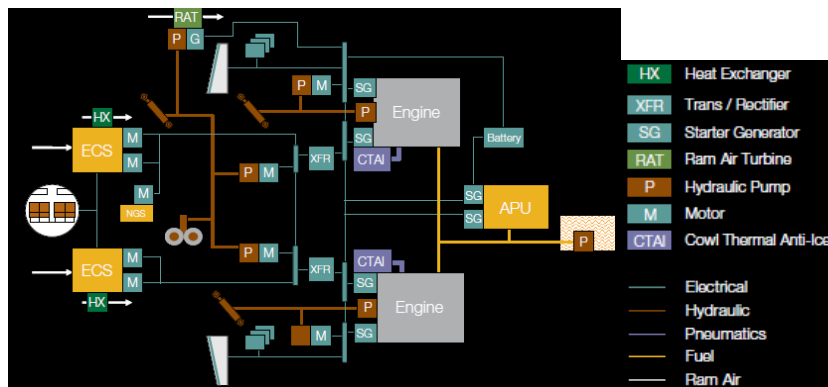


図 5 787 の電気系統 2)

4. 航空機の各部位における MEA の実例と動向

4. 1 飛行制御 (フライト・コントロール)

通常機ではすべての舵面は油圧で操作される。現状では、耐空証明を取得する為には 3 系統の独立な油圧システムを持たなければならない、個々の油圧系統はエンジンで駆動するそれぞれの油圧ポンプを持つことになる。すべての油圧系統は常に最高の油圧を維持するように求められている。例えば航空機が比較的低速で無風状態の穏やかな天候の中を巡航している時でさえ油圧は最高に保たれている。EHA あるいは電気機械式アクチュエータ (Electro-Mechanical Actuator : EMA) を使えば、この機能は不要となる。

民間航空機に初めて採用された電動アクチュエータは A380 の EHA (図 6 左 参照) であり、アクチュエータに付随した電気モーターがそばにある油圧ポンプを回し油圧を高めてアクチュエータを作動させる (図 6 右 参照)。このように、油圧系コンポーネント (アクチュエータ、アキュムレータ、制御バルブ) とモーターが組み合わされて 1 つのコンパクトなユニットになっている。

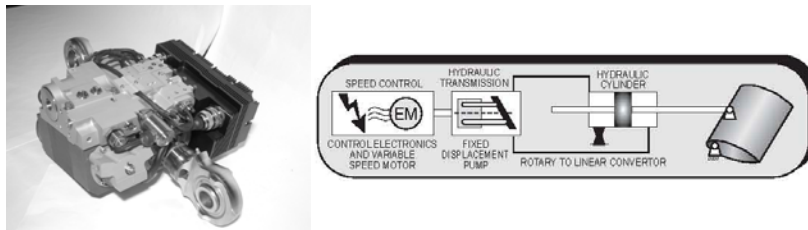


図 6 (左) A380 用 EHA³⁾、(右) EHA の動作原理⁴⁾

EHA の派生装置として、集中油圧系アクチュエータのバックアップ装置として機能するバックアップ EHA (EBHA) も開発されている。EBHA は、通常はモーターへの電力供給は遮断されており集中油圧系で駆動され、集中油圧系故障時にはモーターが起動され必要な油圧を供給する。EBHA は従来の油圧動作部と電気モーターを持つため、EHA よりサイズは大きくなる (図 7 参照)。図 8 に、従来の油圧式、EHA 及び EBHA の動作概要の比較を示す。



図 7 MOOG 社の EBHA⁴⁾

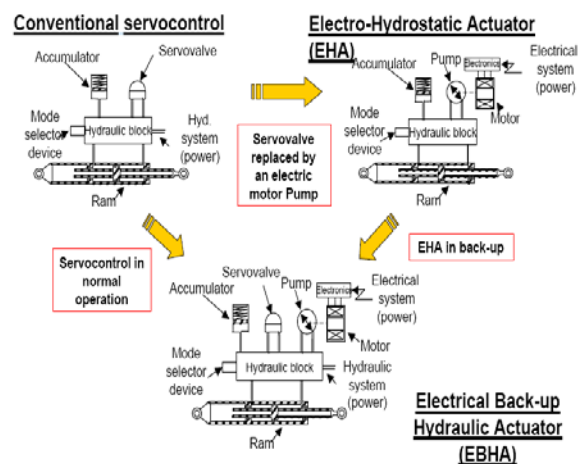


図 8 従来の油圧式、EHA 及び EBHA の動作概要の比較⁴⁾

EHA の次に開発されているのは EMA である。EMA のアクチュエータはモーターで駆

動され、モーターの回転運動をアクチュエータの直線運動に変換するには通常ボールねじが用いられる (図 9 右 参照)。EMA は油圧系コンポーネントを全く使用しないため、EHA あるいは EBHA よりもコンパクトかつ軽量である (図 9 左 参照)。EHA は局部的であっても常に油圧を維持する必要があるが、EMA は制御翼面の位置を変える時だけ動力を使い、後は眠った状態にすることができる。したがって EMA のエネルギー効率は EHA よりすぐれている。

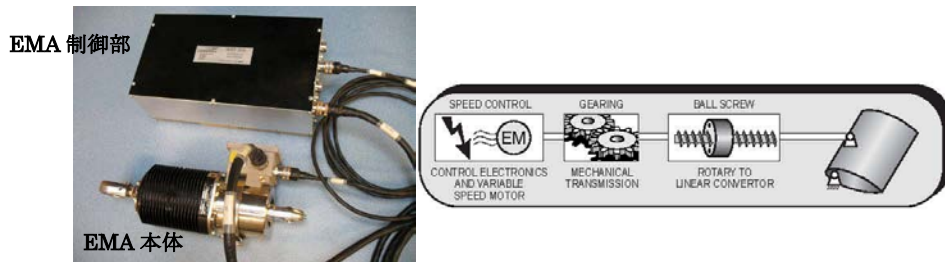


図 9 (左) EMA 試作品⁵⁾、(右) EMA の動作原理⁴⁾

しかしながら、EMA は未だ必要な信頼性と耐久性を保証できる状態に至っていない。EMA は電気モーターの回転運動をアクチュエータ用の往復運動に変換する必要がある。EMA は機械的にジャミング (状態が固定され、復旧できない故障) を起こし易い。すなわち、ボールナットが、回転するスクリューの上でしばしば固定されてしまう。アクチュエータのジャミングからどのように安全に復旧できるかが熱心に研究されているが、まだ決定的な改善策はない。

油圧式アクチュエータの事故率は機械式アクチュエータのそれに比べ 100 分の 1 以下であり、EMA の設計が充分信頼に足るか、故障が起きても安全な状態を維持できることを実証する必要がある、この作業は現在も継続中である。

4. 2 降着装置

舵面制御の技術的な原則が、降着装置、ブレーキなどにも適用される。通常機ではこれらの装置も集中油圧システムで作動する。EHA あるいは EMA を活用すれば、集中の油圧装置から切り離して作動させることができる。ただし、降着装置を引っ込める操作だけは大きな力 (数十トン) を必要とするので、集中油圧システムを持っている限り、そちらに頼る方が効果的である。一方、前輪にはそれほどの力を必要としないので EHA/EMA の検討がより進んでいる。

すでにブレーキの電気化は実用化されており、787 では EMA 型の電気式ブレーキを採用している (図 10 参照)。ブレーキ部分では摩擦熱が発生し、この熱が油圧アクチュエータの作動油などに引火し、火災が発生する危険性を持っているため、降着装置から作動油を除去することは重要な課題となっていた。

次に進められているのが自走式車輪である。航空機の離発着密度が多い空港では、出発時にターミナルビルを離れ



図 10 787 の電気式ブレーキ⁶⁾

てから実際に離陸するまでに20~30分もかかる場合がある。この場合でもエンジンは燃料を消費し続けており、燃料の無駄となっている。これを改善するためにエンジンに頼らず、電気モーターで自走する車輪の研究が進められている。

地上での移動のために前輪に取り付けられたモーターに電気を供給することにより、航空機がエンジンを使用せずに陸上を走行することができる(図11 参照)。現在、欧州の wheeltug 社、SAFRAN グループと米国 Honeywell の合同チーム及びドイツ航空宇宙センター(DLR)などが開発を行っている。SAFRAN グループと米国 Honeywell の合同チーム及び wheeltug 社は実際の航空機に装着した実験を進めている。

さらに、前輪の舵取り用アクチュエータの電氣化が研究されている。本装置は陸上を走行する場合だけに操縦が必要なため、舵取りのための安全要求事項は飛行制御ほど厳重ではない。しかし、機材故障時にも舵取りが必要であるため、アクチュエータ部分から舵取りの回転部分を離すためにクラッチ・メカニズムの使用が検討されている(図12 参照)。



図11 自走前輪⁷⁾

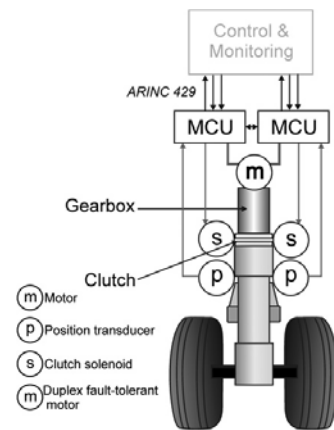


図12 電氣式前輪舵取り装置の概念⁸⁾

4. 3 空調・与圧

通常機ではエンジンから抽気したエアを、客室の暖房、空調、与圧に使う。エンジンから出た直後のエアは非常に熱いので熱交換器で冷やされる。この為に太いダクト(直系7-8インチ)をエンジンから始めて機体中を張り巡らせねばならない。

MEAにより、抽気による機内環境制御(与圧、吸熱、冷暖房)システムに代わって、電氣的コンポーネントから成るシステムが使用できる。MEAの空調機では、キャビンの与圧には電動コンプレッサが用いられ、適切なヒートポンプが冷房に用いられる。図13(左)は従来型の空調システム概念を示したものであり、電氣化された空調システムの実例として、787の空調システム概念を図13(右)に示す。

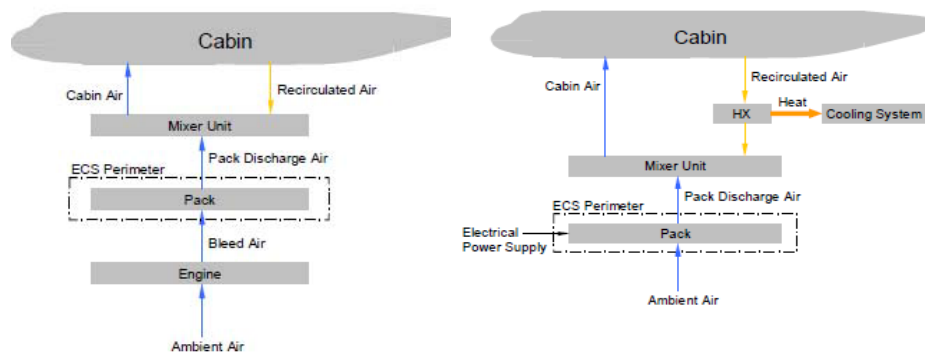


図13 (左) 従来の空調システム概念²⁾、(右) 787の空調システム概念²⁾

また、787 に搭載されている電気式空調機 の概念図及び外観を 図 14 に示す。

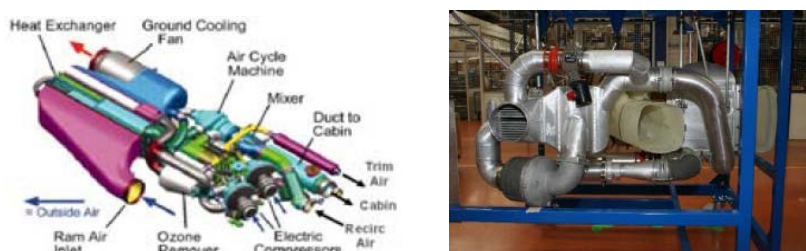


図 14 (左) B787 空調機 の概念図²⁾、(右) B787 の空調機外観²⁾

4. 4 補助動力装置(Auxiliary Power Unit : APU)

通常機では APU がエンジン始動用の空気圧を供給し、必要な電力の発生や油圧の維持に使われる。将来的に MEA が普及すれば APU の役目は電力の発生だけに限られる。

従来型の APU は、メインエンジンを始動するための空気圧システムのコンプレッサを駆動する小型ジェットエンジンと発電機から成っている。MEA が進むことにより、APU は空気圧システムに動力を供給する必要がなくなるため、ジェットエンジン駆動の APU に代えて燃料電池による給電を実現することが将来の目標となる。

航空機用電源としての燃料電池の研究は海外で多く進められているが、米国のボーイング社と日本の I H I 社が共同で再生型燃料電池 (図 15 参照) の開発を進めている。従来の燃料電池は定期的に燃料 (水素など) を補給する必要があるが、再生型燃料電池はエンジンの発電機に余裕がある時に水を電気分解し、水素を生成して蓄積することができ、この水素を使用して発電するため、基本的に燃料の補充が必要ない。



図 15 再生型燃料電池外観⁹⁾

5. おわりに

A380 と 787 において、MEA は色々取り入れられたが、将来の MEA に期待される用途を例示すれば以下の項目があげられる。

- エンジン用燃料ポンプやオイルポンプは現在エンジンにより機械的に駆動されているがこれは電気式ポンプに代わる。
- 油圧式操縦システムは EMA に置き代わる。
- ターボエンジン方式の APU は燃料電池方式に代わる。

しかし現状では、空気圧システム、油圧システム、電気システムは、他システムと関係なく設計されているようなものである。関連システムを考慮せず一つのシステムのみに注目して電気システムを導入しようとするのは、ある意味ではその航空機自体に贅肉を付けていることにもなりかねない。電気技術は航空機のシステムすべてに関与してくるので、MEA のためには従来の個別設計の仕組みを変えねばならないという考えが生まれた。

その対応策として欧州では、動力最適化航空機 (Power Optimized Aircraft : POA) 研究プログラム (2002-2006) が行われた。これは、一つの統合化されたシステムとしての航空機を最適化する重要性を認識している表れである。このプログラムは、最適化研究を実施する恒久的な試験設備と認証設備の建設を含んでいる。その後、次世代航空機のための電気化技術 (More-Electric Technology for Next-Generation Aircraft : MOET) 研究プログラム (2006-2009) を行い、POA の結果をベースに航空機全体の最適化を睨んだ MEA の技術検討を行った。

今後、航空機設計者は今まで以上に航空機を一つの統合されたシステムと考え、航空機全体の効率と安全性を高めるように努める必要があり、MEA の目標は個々のシステムを個別に最適化するより、統合されたシステム全体を最適化する方向に向かっていく必要がある。

参考文献

- 1) Dominique van den Bossche,
“THE A380 FLIGHT CONTROL ELECTROHYDROSTATIC ACTUATORS,
ACHIEVEMENTS AND LESSONS LEARNT”
http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE_CD1998-2010/ICAS2006/PAPERS/048.PDF
- 2) Ilan Berlowitz,
“All/ More Electric Aircraft Engine & Airframe Systems Implementation”
<http://jet-engine-lab.technion.ac.il/9ajies/9.All,More%20Electric%20Aircraft%20Engine%20&%20Airframe%20Systems%20Implementation,%20Bede%20Aviation%20Group,%20Aircraft%20Programs%20Division,%20Israel%20Aerospace%20Industries,%20Israel.pdf>
- 3) Xavier Le tron, “A380 Flight Controls overview”
<http://www.coe.pku.edu.cn/tpic/20119195656394.pdf>
- 4) Amit Kulshreshtha,
“ELECTRIC ACTUATION FOR FLIGHT & ENGINE CONTROL:EVOLUTION &
CHALLENGES
http://acgsc.org/Meetings/Meeting_99/SubcommitteD/Electric_Actuation-SAE%20ACGSC-Boulder%20Mtg%202007.pdf
- 5) Benjamin Legrand, Jérôme Loyer, Guillaume Manon, Jean-Michel Perrochat, Timo Ruprecht, Hannes Wagner, “EMA technology development”
<http://www.eurtd.com/moet/PDF/N.pdf>
- 6) Tim Nelson, “787 Systems and Performance”
<http://dibley.eu.com/documents/B787SystemsandPerf-GeorgeBeyle-31mar09.pdf>
- 7) SAFRAN HP,
<http://www.safranmbd.com/activites/electric-green-taxiing-system>
- 8) J.W. Bennett B.C. Mecrow D.J. Atkinson G.J. Atkinson Safety-critical design of electromechanical, “actuation systems in commercial aircraft”,
IET Electr. Power Appl., 2011, Vol. 5, Iss. 1, pp. 37-47
<http://www.ncl.ac.uk/eee/assets/posters/paper20a.pdf>

9) IHI HP,

http://www.ihl.co.jp/ihl/all_news/2012/press/2012-10-04/index.html