

- mantenere le caratteristiche meccaniche ed elettriche in tutta la gamma di condizioni operative (effetti della temperatura).

Per quanto riguarda la guaina isolante, questa:

- deve resistere alle abrasioni;
- deve resistere alla corrosione causata da gas e liquidi con cui può venire in contatto;
 - non deve alimentare combustioni;
 - se surriscaldata, non deve emettere fumi tossici.

L'industria aeronautica utilizza cavi specificamente progettati e prodotti, diversi dai comuni cavi elettrici e dotati di tutte le proprietà richieste dalle specifiche aeronautiche.

Molti sono gli aspetti aeronautici da tenere presenti nell'organizzazione di un impianto elettrico di bordo. L'impianto elettrico deve essere realizzato tenendo conto delle esigenze di manutenzione, che deve poter essere effettuata agevolmente e con rapidità, per ristabilire o verificare la perfetta funzionalità dell'impianto. Agevoli manutenzioni ed ispezioni contribuiscono a ridurre al massimo i tempi di intervento ed i conseguenti fermi macchina, con risparmio nei costi di gestione; la possibilità di agevoli controlli sistematici dell'impianto costituisce inoltre un importante fattore che contribuisce all'incremento dell'affidabilità. Le stesse scelte strutturali dei progettisti devono tenere in debito conto la possibilità (per tutti gli impianti) di potersi sviluppare armoniosamente, consentendo una collocazione delle utenze che rispetti le esigenze di sicurezza ed ispezionabilità. Uno dei provvedimenti specifici da adottare nel montaggio del velivolo e del suo impianto elettrico è la realizzazione della continuità elettrica tra parti metalliche non continue. Infatti, la struttura metallica dell'aereo deve rappresentare dal punto di vista elettrico una unica grande massa, avente bassa resistenza elettrica, consentendo così la eliminazione dei cavi elettrici di ritorno mediante la messa a terra dell'impianto. Tale soluzione, oltre a consentire risparmi di peso e spazio, è richiesta per la riduzione delle interferenze elettriche sugli apparati di bordo e per la prevenzione del pericolo di scariche elettrostatiche tra parti diverse del velivolo. Naturalmente, occorre prendere le adeguate precauzioni per evitare la corrosione delle connessioni tra metalli diversi.

1.8. Generazione di corrente elettrica

La generazione dell'energia elettrica avviene attraverso generatori, dinamo o alternatori, che possono essere azionati meccanicamente da:

- i riduttori dei propulsori;
- motori idraulici o pneumatici;
- A.P.U. (Auxiliary Power Unit), quando il velivolo è fermo a terra;
- R.A.T. (Ram Air Turbine), una piccola elica posta nel vento relativo in casi di emergenza;

Alternativamente un velivolo parcheggiato può disporre di energia elettrica tramite connessione a terra (G.P.U. Ground Power Unit).

In condizioni normali di esercizio, il caso più frequente è il primo. Solitamente si ha un generatore per ciascun motore nei velivoli plurimotori, mentre nei monomotori possono esserci anche due generatori collegati all'unico motore. Si ha sempre uno o più generatori sull'APU.

Ad esempio, il Boeing 747 ha l'impianto primario in corrente alternata con 4 alternatori da 60 KVA sui 4 propulsori e due alternatori da 90 KVA sull'APU. Il BAe 146, pur essendo quadrimotore, ha solo due alternatori da 40 KVA sui motori esterni ed uno sull'APU. Il SIAI S 211 ha l'impianto primario in continua, con starter - generatore sul propulsore, e corrente alternata ottenuta da due invertitori. L'ATR42 ha una configurazione particolare: ognuna delle due turboeliche ha sia uno starter - generatore che un alternatore, generando quindi entrambi i tipi di corrente contemporaneamente.

Una fonte di energia elettrica sempre presente è comunque costituita dagli accumulatori, che devono soddisfare l'esigenza di creare una riserva di energia da utilizzare in mancanza di generazione per guasto dell'impianto o del propulsore, in caso di assorbimenti superiori alla potenza fornita dai generatori (batterie tampone) e ovviamente quando i propulsori sono fermi.

A bordo dei missili vengono spesso usate delle piccole batterie, in quanto tutte le utenze devono funzionare solo per pochi minuti; in alcuni casi, se le potenze elettriche richieste sono elevate, si usano degli alternatori trascinati da apposite turbinette alimentate dalla combustione di cartucce pirotecniche.

L'evoluzione dell'applicazione dell'energia elettrica a bordo dei velivoli è mostrata nella tabella riportata in fig. 1.10.

Costruttore	Modello	Primo volo	pax (max)	pot./pax (W)	mot n.	gen-DC		gen-AC			capacità sistema
						n.	(kW)	n.	(kVA)	(Hz)	(note)
Douglas	DC 3	1935	32	188	2 x el	2	3				200A 28V DC
DeHaviland	Comet	1947	102	439	4 x jet			4	14	var	1400A 28V DC
Vickers	Viscount	1948	75	631	4 x el	4	6	4	7.3	var	800A 28V DC + de-icing AC(*)
Hawker	Heron	1950	17	235	4 x el	4	1				140A 28V DC
Airspeed	Ambassador	1950	50	480	2 x el			2	15	var	400A 28V DC + de-icing AC
Bristol	Britannia	1952	139	1036	4 x el			4	45	var	480A 28V DC + 360A 112V DC + AC
Boeing	B707	1958	219	438	4 x jet			4	30	400	
Vickers	Vanguard	1959	139	1727	4 x el			6	50	var	2000A 28V DC (2 AC de-icing)
Hawker	Trident	1962	140	386	3 x jet			3	22.5	400	
Boeing	B727	1963	189	508	3 x jet			3	40	400	
McDonaldD.	DC9	1965	139	460	2 x jet			2	40	400	
Boeing	B747	1969	568	338	4 x jet			4	60	400	
McDonaldD.	DC10	1970	380	568	3 x jet			3	90	400	
Boeing	B767	1978	245	588	2 x jet			2	90	400	
McDonaldD.	MD80	1980	172	372	2 x jet			2	40	400	
Airbus	A300	1983	267	539	2 x jet			2	90	400	
ATR	ATR42	1984	50	1120	2 x el	2	12	2	20	var	28V DC + 2 inv 115/28V AC (AC de-icing)
Airbus	A320	1987	179	804	2 x jet			2	90	400	
McDonaldD.	MD11	1990	410	702	3 x jet			3	120	400	
Domier	328	1991	32	1750	2 x el	2	12	2	20	290-440	
Bombardier	Global Express	1994	19	6737	2 x jet			4	40	324-596	
Boeing	B777	1994	440	436	2 x jet			2	120	400	+ 2 x 20 kVA f-var (Inverter+PMG)

Fig. 1.10 - Evoluzione dell'energia elettrica di bordo.

1.9. Generazione di corrente continua

La corrente continua, indicata secondo la simbologia anglosassone dalla sigla DC (Direct Current), è caratterizzata da una tensione di esercizio pari a 28 V se proveniente dai generatori, e pari a 24 V se proveniente dalle batterie.

Tali valori sono stati scelti fin dagli inizi della tecnologia aeronautica, come quelli risultanti da un giusto compromesso tra una tensione sufficientemente sicura ed un peso dei cablaggi sufficientemente leggero. Infatti, confrontando tra loro due impianti di pari potenza, costruiti con gli stessi materiali ma funzionanti con diverse tensioni di esercizio, si trova che l'impianto alimentato con tensione maggiore ha un peso complessivo minore dell'altro in quanto utilizza conduttori aventi minore sezione.

Inoltre, disponendo di un generatore a 28 V è possibile mantenere costantemente sotto carica le batterie, le quali hanno una tensione nominale di 24 V; tale soluzione è molto importante in quanto le batterie rappresentano l'unica sorgente di energia elettrica in caso di avaria dei generatori.

Per la generazione di corrente continua viene utilizzata la dinamo; la dinamo è costituita da un certo numero di spire che ruotano in un campo magnetico permanente (in fig. 1.11 è rappresentata per semplicità una sola spira); in questo modo si crea in ogni spira del rotore una corrente variabile in modo sinusoidale; la corrente deve essere prelevata dal rotore attraverso spazzole; se il collettore è opportunamente diviso in settori si riesce a prelevare una tensione che, fissato il numero dei giri, ha un valore pressoché costante dato dalla somma delle correnti di ogni spira.

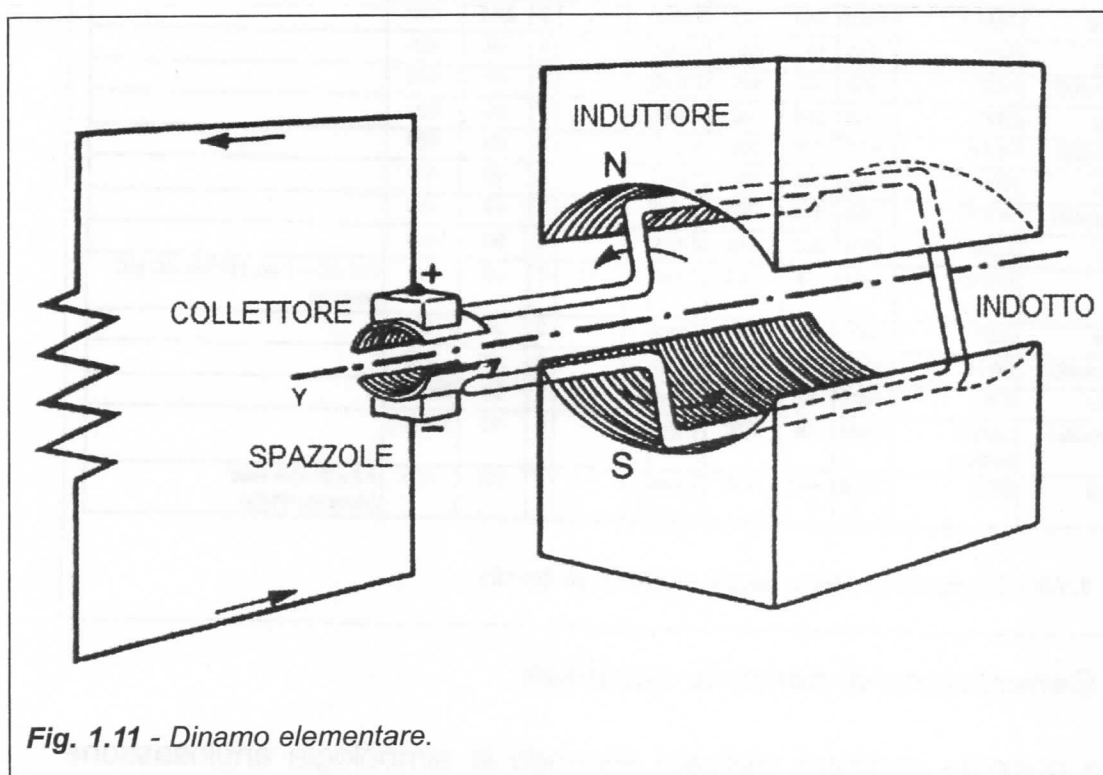
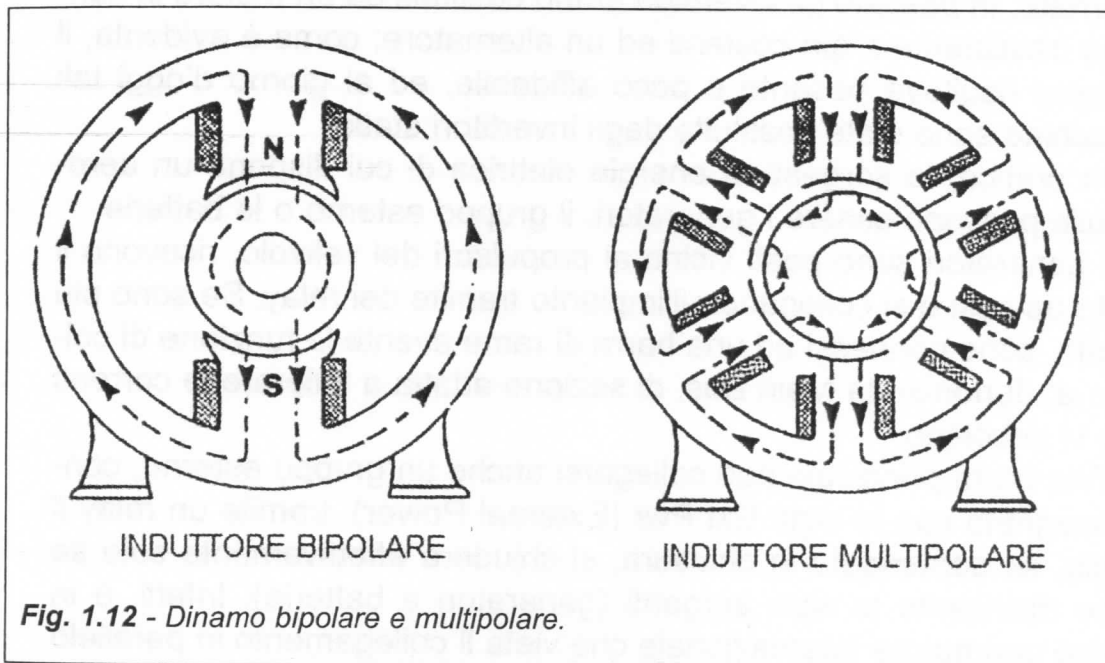


Fig. 1.11 - Dinamo elementare.

L'induttore è la parte che deve produrre il flusso magnetico. Questo è in genere la parte fissa, per cui si chiama anche statore. Nel caso più elementare, l'induttore è realizzato da un magnete permanente. In tal caso però non è possibile ottenere flussi magnetici abbastanza intensi, se non usando grossi magneti con aggravio di peso. Quindi si ricorre ad elettromagneti. Gli induttori possono avere una o più coppie di poli. L'induttore bipolare viene utilizzato solo per dinamo di piccola potenza, mentre per generatori più grandi è conveniente usare induttori multipolari (fig. 1.12). In questo modo si limita la dispersione magnetica ed il peso a parità di potenza generata.

Il problema principale è che il numero di giri della dinamo non è in pratica mai costante, e siccome la tensione erogata è funzione del numero di giri, le dinamo devono essere corredate di regolatori per

garantire la costanza della tensione. Nel caso della dinamo tradizionale, si usa come generatore del campo magnetico un elettromagnete, la cui intensità viene regolata in base all'uscita.



La dinamo ha il vantaggio di essere una macchina reversibile, cioè può essere usata anche come motore: infatti in molti casi viene utilizzata oltre che come generatore anche come motorino di avviamento (starter - generatore). Tuttavia, questo è possibile solo per motori a turbina di potenza limitata; per motori a turbina di grande potenza o per motori alternativi, la coppia necessaria per l'avviamento è troppo elevata per uno starter - generatore e si preferisce dividere i compiti fra due macchine separate, una dinamo per la generazione di energia elettrica in corrente continua, ed un motore per l'avviamento; per i motori alternativi è necessario un motorino elettrico per l'avviamento, ma esso può essere sottodimensionato perché deve funzionare per tempi molto brevi; per i grossi motori a turbina l'avviamento avviene normalmente prelevando energia pneumatica dall'APU.

Qualora le potenze necessarie all'avviamento siano tali da imporre la rinuncia del vantaggio offerto dalla dinamo di essere una macchina reversibile, non risulta in pratica conveniente il suo utilizzo. Quindi in tal caso la generazione della corrente continua avviene comunemente attraverso generatori senza spazzole, ovvero degli alternatori la cui uscita viene raddrizzata e stabilizzata. Questa tecnica, del resto diffusa anche in campo automobilistico, consente, a parità di potenza, di avere generatori di dimensioni e pesi inferiori ed elimina il problema della manutenzione delle spazzole.

Dall'impianto in corrente continua si possono alimentare le utenze che richiedono corrente alternata attraverso gli invertitori, sistemi che ricevono in ingresso corrente continua e forniscono in uscita corrente alternata. In passato gli invertitori erano costituiti da un motore in continua trascinante a giri costanti ed un alternatore; come è evidente, il sistema risultava pesante e poco affidabile, ed al giorno d'oggi tali macchine sono state sostituite dagli invertitori statici.

In pratica, le sorgenti di energia elettrica di cui dispone un aeromobile possono essere i generatori, il gruppo esterno o le batterie.

I generatori sono posti vicino ai propulsori del velivolo, ricevono il moto da essi e si collegano all'impianto tramite dei relay. Se sono più di uno, sono connessi ad una barra di rame avente la funzione di collettore, denominata Main Bus, di sezione adatta a tollerare le correnti che vi circolano.

Alla barra principale può collegarsi anche un gruppo esterno, contrassegnato con la sigla Ext Pwr (External Power), tramite un relay il quale, se comandato in chiusura, si chiuderà effettivamente solo se sono disinserite le altre sorgenti (generatori e batterie). Infatti, è in vigore una norma internazionale che vieta il collegamento in parallelo tra sorgenti di terra (gruppo esterno) e sorgenti di bordo (generatori e batterie).

Le batterie si collegano tramite un relay (battery relay) ad una barra, denominata Battery Bus, che nelle normali condizioni di volo è collegata alla Main Bus tramite un relay di interbarra: in tali condizioni pertanto le batterie ricevono la carica dai generatori. Infatti, i generatori forniscono una tensione di 28 V mentre le batterie hanno una tensione di esercizio di 24 V; questa differenza di potenziale è più che sufficiente a mantenerle costantemente sotto carica.

In caso di emergenza elettrica, cioè in caso di avaria dei generatori, essendo le batterie l'unica sorgente di alimentazione elettrica, si verifica che le utenze collegate alla barra di emergenza non risentono della differenza di tensione di alimentazione (dai 28 V dei generatori ai 24 V delle batterie). Infatti, in caso di emergenza elettrica, il relay di interbarra che unisce la barra della batteria (Battery Bus) con la barra principale (Main Bus) viene aperto, determinando così l'isolamento della barra principale delle batterie. In queste condizioni viene alimentata la sola barra di emergenza (Emergency Bus), sulla quale sono collegate le utenze indispensabili per proseguire il volo.

1.10. Generazione di corrente alternata

La corrente alternata, indicata secondo la simbologia anglosassone con la sigla AC (alternate current) è caratterizzata da una tensione di esercizio pari a 115/200 V, e da una frequenza che può essere variabile o costante, in tal caso pari a 400 Hz.

Tale corrente viene prodotta da alternatori che sono, nella maggior parte dei casi, trifasi, e pertanto con il valore di tensione 115/200 V si vuole indicare che la tensione tra una fase e la massa è pari a 115 V, mentre la tensione tra fase e fase è pari a 200 V. L'utilizzo di un valore di tensione così elevato rispetto al valore normalmente utilizzato per la corrente continua è stato possibile grazie alla bontà dei nuovi isolanti.

Il valore di frequenza di 400 Hz è stato scelto piuttosto elevato per una rete elettrica di distribuzione (tenendo presente che negli impianti domestici si usa una frequenza di 50 o 60 Hz) al fine di alleggerire il peso dei componenti che utilizzano la corrente alternata; infatti, si verifica che aumentando la frequenza della corrente diminuisce la quantità dei nuclei ferrosi da inserire nelle macchine elettriche, e quindi il peso complessivo di queste.

Per la generazione della corrente alternata vengono usati alternatori monofase (fig. 1.13) o, molto più comunemente, trifase; in ogni caso l'alternatore ha la caratteristica di creare una corrente la cui frequenza dipende dalla velocità angolare del generatore. Nel generatore trifase vi sono 3 avvolgimenti monofase, sfasati di 120° ed immersi in un campo magnetico rotante; non vi sono spazzole ed il tutto viene raffreddato ad aria. Tuttavia, accoppiando direttamente il generatore al propulsore si ha una frequenza f che dipende dal regime del propulsore stesso, ovvero dalla velocità angolare n (in rpm) e dal numero di poli p , secondo la relazione:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

Questo fatto ha portato alla realizzazione di impianti a frequenza variabile, impianti che sono idonei ad alimentare un grande numero di utenze, ovvero tutte quelle per le quali è indifferente l'impiego di corrente continua o alternata. Però, per le utenze che richiedono frequenze di esercizio ben precise, è ovvio che tale soluzione non sia idonea; d'altra parte, occorre anche osservare che, nella maggioranza dei casi di generazione in corrente alternata, si tratta di velivoli plurimotori di grosse dimensioni e di impianti elettrici di elevata potenza con più generatori accoppiati ai diversi propulsori; nasce quindi l'ulteriore esigenza di collegare in parallelo i diversi generatori, e tale collegamento è possibile solo se i generatori funzionano in modo sincrono, e quindi con uguale frequenza e uguale fase.

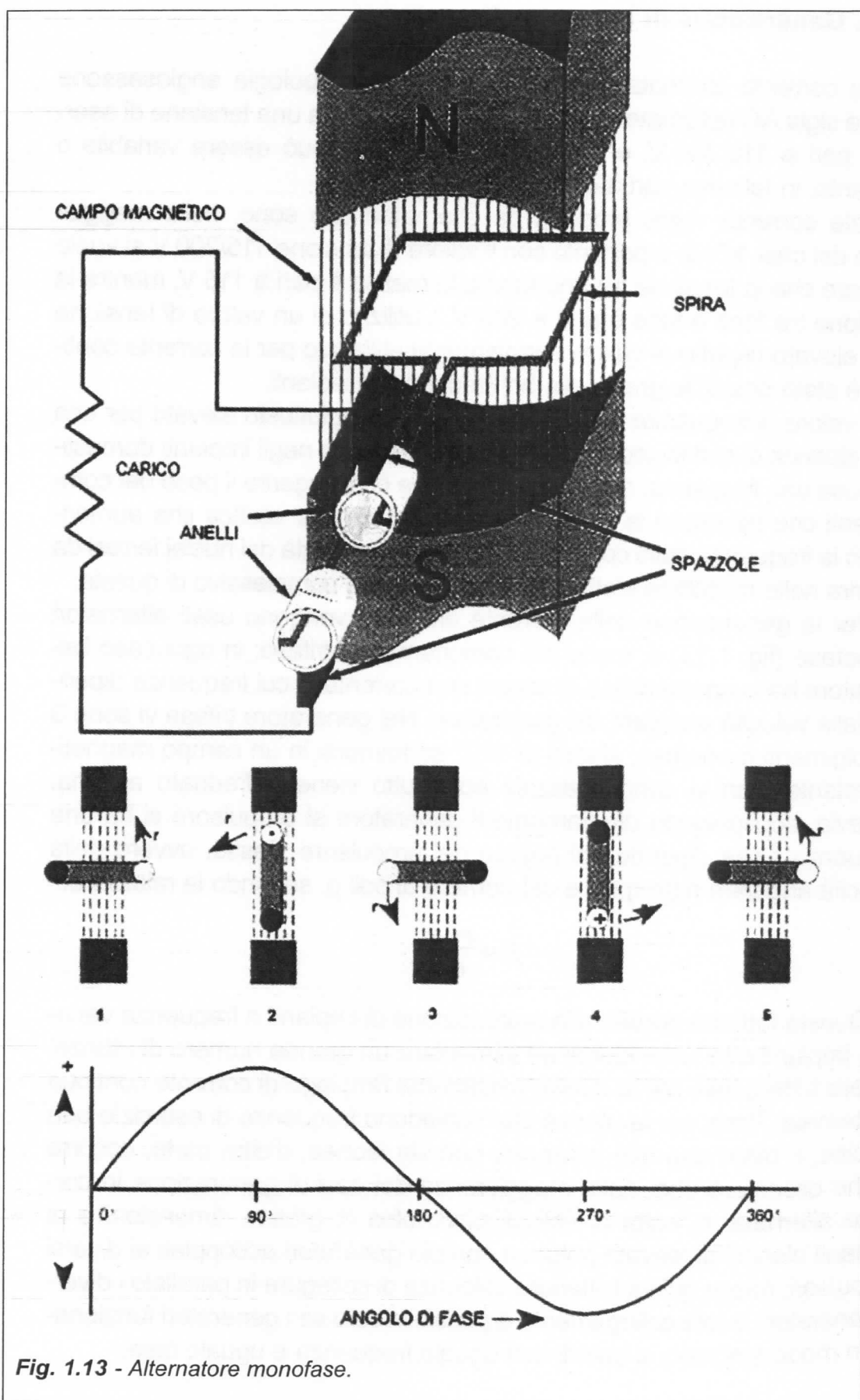


Fig. 1.13 - Alternatore monofase.

In aggiunta ai dispositivi di regolazione della frequenza di tipo meccanico come quelli visti in precedenza, che hanno un'affidabilità inferiore a quella della turbina e dell'alternatore in sé, sono comunque disponibili anche dispositivi completamente elettronici a componenti solidi, che presentano il notevole vantaggio di poter essere installati lontano dal propulsore, e quindi in condizioni ambientali più favorevoli.

I generatori richiedono comunque apparecchiature di controllo per la regolazione della potenza fornita, tali da assicurare il mantenimento dei valori di tensione e di frequenza entro i valori richiesti.

I generatori, pur avendo rendimenti piuttosto elevati, presentano comunque delle perdite che portano alla generazione di calore e quindi alla necessità di un sistema di raffreddamento; pertanto, nell'installazione del generatore, che deve assicurare il funzionamento in modo continuativo per tutta la durata del volo, occorre tenere conto della necessità di raffreddamento del generatore, mediante sistemi ad aria o ad olio.

Per soddisfare alle necessità delle utenze alimentate in corrente continua, si utilizzano i trasformatori – raddrizzatori (TRU, transformer rectifier unit).

Si osservi che la potenza erogabile da un alternatore è espressa in voltampere (VA) e non in watt (W). Tale potenza è la cosiddetta potenza apparente, data dal prodotto della tensione massima per l'intensità massima. In genere, quando l'alternatore è collegato in rete, si crea uno sfasamento tra onda di tensione ed onda di intensità, e quindi il loro prodotto è minore e fornisce la potenza reale, in W. Il rapporto tra potenza reale e potenza apparente viene definito fattore di potenza.

Il generatore di tipo brushless (senza spazzole) attualmente ha sostituito tutti i tipi di alternatori precedentemente usati per alimentare in AC gli aeromobili. Ogni generatore di questo tipo è costituito da 3 parti fondamentali: alternatore a magnete permanente, alternatore di eccitazione, alternatore di potenza.

L'alternatore a magnete permanente ha lo scopo di creare una corrente alternata che, opportunamente elaborata, serve per alimentare un complesso (esterno al generatore) denominato pannello di controllo del generatore, il quale ha il compito di eccitare il generatore stesso.

L'alternatore di eccitazione ha il compito di creare una corrente alternata che viene utilizzata per creare un campo magnetico per eccitare lo stadio finale dell'alternatore. Le bobine di eccitazione poste sullo starter sono alimentate dal pannello di controllo del generatore. I raddrizzatori posti sul rotore hanno il compito di raddrizzare la corrente alternata ed inviarla allo stadio successivo.

L'alternatore di potenza è uno stadio che, pilotato da quello prece-

dente, ha il compito di fornire all'impianto la f.e.m. (forza elettro motrice) che è di tipo trifase con collegamento a stella. I morsetti sono collegamenti a massa fuori dall'alternatore per permettere una funzione protettiva del generatore.

Per pannello si intende una scatola contenente circuiti e relay atti a compiere determinate funzioni. Ogni generatore in AC per aeromobile possiede almeno due pannelli di controllo aventi le funzioni di regolatore di tensione e di controllo del generatore

Il pannello regolatore di tensione ha il compito di mantenere costante la tensione del generatore ed è alimentato dal generatore stesso. La linea che collega l'uscita del regolatore di tensione al generatore può essere interrotta dall'intervento di una qualsiasi protezione.

Il pannello di controllo del generatore ha il compito di comandare l'apertura e la chiusura dei GR, dei BTR, dei FR (Field Relay – circuito di campo) e di tutti quei relay asserviti al generatore. Questo pannello è normalmente alimentato dal generatore stesso tramite un'unità rettificatrice collegata prima dei GR. In caso di diseccitazione del generatore lo stesso pannello è alimentato dalla barra della batteria (Battery Bus). I due raddrizzatori hanno la funzione di valvole di non ritorno cioè assicurano l'alimentazione al pannello di controllo senza che le sorgenti abbiano ad influenzarsi tra loro. Il pannello di controllo del generatore è inoltre interconnesso con l'interruttore di comando del generatore il quale predispone la chiusura o l'apertura dei GR. (Essendo inoltre interconnessi tra loro GR e BTR si avrà che l'apertura dell'uno determinerà la chiusura dell'altro e viceversa).

1.11. Distribuzione di corrente elettrica

La distribuzione della corrente elettrica consiste nel trasferimento dai generatori verso le barre di carico e, attraverso queste, nella distribuzione agli utilizzatori. Nell'impianto elettrico esistono diverse barre di carico indipendenti, ognuna delle quali alimenta un certo numero di utenze; le utenze vengono a questo fine suddivise in base alla loro importanza e rilevanza dal punto di vista della sicurezza del velivolo; si avranno così barre essenziali, primarie e secondarie.

Le barre essenziali sono sempre collegate al gruppo generatore di potenza, mentre le barre primarie e secondarie possono essere escluse in conseguenza di guasti ai generatori o alle barre stesse; è necessaria quindi la presenza degli organi di manovra in grado di escludere le singole barre, e degli organi di sicurezza e di manovra per il collegamento delle varie utenze.