

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Elettronica

RELAZIONE DI TIROCINIO

**ANALISI DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE ELETTRICHE
DI UNA BICICLETTA A PEDALATA ASSISTITA**

RELATORE: **Prof. Silverio Bolognani**

LAUREANDO: **Andrea Peraro**

Anno Accademico 2009-2010

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

Introduzione

Le biciclette elettriche a pedalata assistita sono ormai diventate al giorno d'oggi un diffuso mezzo di trasporto, specialmente nell'ambiente urbano. Sempre più frequentemente in città ma anche in piccoli centri vediamo persone spostarsi con questi mezzi, veicoli moderni ed eleganti che consentono di muoversi nel traffico con molta agilità.

Sono molti i vantaggi che le biciclette a pedalata assistita (spesso abbreviate con e-bike) presentano: sono esenti da costi di assicurazione e soprattutto dai continui aumenti del costo del carburante, non inquinano, non hanno problemi di parcheggio e consentono di fare meno fatica rispetto alle tradizionali biciclette.

Negli ultimi 20 anni il miglioramento della qualità del prodotto, in particolare per le sue componenti elettroniche sempre più affidabili e performanti, ha permesso lo sviluppo del mercato del prodotto e la sua diffusione ai livelli attuali, e in alcuni paesi stiamo vivendo la sua fase di boom proprio al giorno d'oggi.

È chiaro che data l'importanza che questi veicoli hanno assunto nella nostra vita, sia nata la necessità di regolamentare adeguatamente il prodotto attraverso opportune norme da rispettare, come avviene per tutti gli altri mezzi di trasporto. È fondamentale che il prodotto sia sicuro ed affidabile, per evitare rischi a danno dell'utente e di altre persone. La popolarità del prodotto è la redditività che tale mercato offre infatti sono stati spesso motori di un'importazione indiscriminata, immettendo in circolazione prodotti di scarsa qualità o non a norma e quindi pericolosi.

Lo scopo del tirocinio è stato quello di prendere conoscenza con il prodotto e-bike nei suoi principali aspetti elettrici, quali ad esempio motore, batteria, caricabatteria, controller, etc. Successivamente il lavoro è stato improntato sullo studio delle eventuali problematiche presentate e nel cercare di apportare (se possibile) delle migliorie in luogo ad esse, avvalendosi anche della possibilità di effettuare delle prove specifiche per lo scopo.

Il tirocinio è stato svolto prevalentemente negli stabilimenti della Cicli Esperia s.p.a., ed in piccola parte nel laboratorio di azionamenti elettrici del dipartimento di ingegneria elettrica di Padova per effettuare varie prove sul motore. Per lo svolgimento del lavoro l'azienda ha messo a disposizione i test report delle prove di compatibilità elettromagnetica effettuati presso i laboratori IMQ s.p.a.

Il primo capitolo presenta lo stato dell'arte della bicicletta elettrica: vengono descritti i progressi compiuti dai primi prototipi fino alle caratteristiche dei modelli moderni, gli sviluppi del mercato fino ad oggi e infine presentata la bicicletta elettrica in generale in tutte le sue funzionalità, per poi descrivere le caratteristiche del modello su cui si è lavorato.

Il secondo capitolo presenta un'analisi dettagliata del motore installato sul mezzo. Il motore in questione fa parte della particolare categoria denominata DC-brushless: viene analizzato il funzionamento di questo particolare modello, con formule ed andamenti delle grandezze e modelli equivalenti, partendo dalle generalità sui motori brushless. Viene inoltre data una descrizione delle prove effettuate sul motore.

Infine il terzo capitolo riguarda l'analisi della compatibilità elettromagnetica, requisito fondamentale di ogni prodotto elettrico. Si parte da una breve introduzione al problema con richiami di teoria, vengono esaminate le norme specifiche per il prodotto e-bike e infine viene data un'analisi delle prove effettuate, riportando i risultati.

Sommario

1	La bicicletta elettrica: stato dell'arte	7
1.1	Introduzione alla mobilità sostenibile	7
1.2	Sviluppo attuale e mercato E-bike.....	10
1.3	Caratteristiche principali E-bike.....	11
1.4	Caratteristiche del prodotto esaminato	15
2	Analisi Motore e descrizione azionamento	17
2.1	Richiami ai motori brushless	17
2.1.1	Caratteristiche principali	17
2.1.2	Struttura e principio di funzionamento	19
2.2	Principio di funzionamento dei motori DC-brushless.....	22
2.2.1	Struttura e principio di funzionamento	22
2.2.2	Modello equivalente DC-brushless	27
2.2.3	Principali grandezze caratteristiche	30
2.2.4	Controllo dei motori trapezoidali	33
2.3	Prove effettuate in laboratorio	36
2.3.1	Misura cogging torque	38
2.3.2	Misura della back-emf	39
3	Analisi della compatibilità elettromagnetica.....	41
3.1	Introduzione alla compatibilità elettromagnetica	41
3.1.1	Elettromagnetismo e origine dei fenomeni di interferenza elettromagnetica	41
3.1.2	La compatibilità elettromagnetica.....	43
3.1.3	Aspetti della compatibilità elettromagnetica.....	45
3.1.4	Cenni storici sulla marcatura CE	48
3.1.5	La direttiva EMC 2004/108/CE	49
3.1.6	Norme Armonizzate	51
3.1.7	Fullcompliance e pre-compliance	52
3.2	Analisi dei test EMC: descrizione prove effettuate e risultati ottenuti.....	53
3.2.1	La direttiva EN 15194 (Epac)	54
3.2.2	Strumentazione.....	55
3.2.3	Prova di emissioni irradiate.....	57
3.2.4	Prove di immunità irradiata.....	58
	Conclusioni.....	59
	Bibliografia.....	61

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

1 La bicicletta elettrica: stato dell'arte

1.1 Introduzione alla mobilità sostenibile

L'aumento dell'inquinamento, il riscaldamento globale e il continuo aumento dei costi dell'energia sono solo alcune tra le più gravi problematiche causate dall'attuale economia basata sul petrolio. L'incremento dell'uso di combustibili fossili quali carbone, gas e petrolio hanno un impatto sempre più rilevante sull'ecosistema e sull'equilibrio climatico del pianeta. Il loro utilizzo nelle attività umane è responsabile ogni anno dell'emissione di circa 25 miliardi di tonnellate di CO₂. Il risultato infatti è che dall'epoca della rivoluzione industriale il livello di CO₂ presente nell'atmosfera è aumentato di circa il 30%, dato destinato addirittura ad aumentare se non verranno prese in considerazione drastiche misure per ridurre significativamente le emissioni inquinanti.

L'utilizzo su larga scala di combustibili fossili nella produzione energetica ha direttamente influenzato i cicli naturali di gas quali anidride carbonica, metano e protossido di azoto causando il noto fenomeno dell'effetto serra.

Con il passare del tempo, ci si rende conto che la situazione diventa sempre più insostenibile, e si sente l'esigenza di aprire la strada a dei cambiamenti che possano invertire la tendenza prima che sia troppo tardi.

Un settore particolarmente legato al problema delle risorse energetiche è quello dei trasporti. Il suo mercato in buona sostanza dipende completamente dal petrolio (con il 67% della domanda finale di petrolio destinato ad esso) e la domanda di energia del settore è in continua crescita: si pensi che dal 1985 al 2000 è stato registrato un aumento da 203 a 298 milioni di tonnellate di petrolio.

Il settore dei trasporti come sappiamo è in continuo aggiornamento e sempre fonte di innovazioni tecnologiche. Da diversi anni l'obiettivo comune di tutti i produttori è quello di limitare le emissioni di CO₂ e soprattutto di limitare più possibile i consumi. Tuttavia, nonostante gli sforzi, i progressi fatti finora non saranno sufficienti a ridurre o a stabilizzare la domanda energetica.

Il problema ha svolto la funzione di incentivo alla ricerca di nuove forme di mobilità alternative alle classiche basate sui motori endotermici. Ci inseriamo dunque nel contesto della *mobilità sostenibile*, ovvero un sistema di trasporti che offra mezzi per soddisfare

appieno i bisogni in modo efficiente, ma in modo “equo”, cercando di diminuire i costi e soprattutto evitando di avere un impatto negativo sull’ambiente.

In questo contesto si collocano i cosiddetti veicoli ibridi (HEV), di cui si sente spesso parlare dato che molte fra le principali case automobilistiche stanno iniziando a metterne in produzione i primi modelli. Si tratta di veicoli che abbinano due sorgenti di potenza distinte, di cui una reversibile: nei modelli ibridi elettrici la sorgente principale di alimentazione è un motore a combustione interna benzina o diesel, affiancato da un motore elettrico alimentato da batterie. In questo modo si riesce a beneficiare dei vantaggi di ciascun motore, aumentando l’efficienza, ed è inoltre possibile percorrere tratti a zero emissioni (ad esempio i tratti dei centri urbani a traffico limitato). Grazie ad un meccanismo di gestione dell’energia, le batterie vengono automaticamente ricaricate durante il moto.

Un’altra categoria è costituita dai veicoli elettrici a celle a combustibile (FCV). Si tratta di fatto di veicoli elettrici, alimentati da celle a combustibile piuttosto che tradizionali batterie. Brevemente, la pila o cella a combustibile (fuel cell) è un dispositivo elettrochimico che permette di ottenere elettricità direttamente da certe sostanze, tipicamente idrogeno ed ossigeno, senza che avvenga alcun processo di combustione termica.

Tali veicoli presentano diversi vantaggi rispetto ai tradizionali veicoli con motori a combustione. In primo luogo vi è la totale assenza di inquinamento prodotto, dato che le emissioni sono costituite solamente da vapore acqueo. Inoltre possono disporre di una elevata autonomia, determinata dalle dimensioni del serbatoio di idrogeno, e cosa ancora più importante la materia prima per il carburante è l’acqua ed è disponibile in ogni paese.

Citiamo infine i veicoli elettrici (BEV), in cui focalizzeremo il nostro studio, ovvero veicoli dotati di un motore totalmente elettrico alimentato da pacchi di batterie. I veicoli elettrici potrebbero essere un esempio ideale di mobilità sostenibile, peraltro con una buona efficienza energetica. In questo caso le emissioni sono totalmente assenti, anche se per la verità i veicoli elettrici provocano una forma di inquinamento indiretto, pensando che le centrali per la produzione di energia possono essere alimentate con combustibili fossili; in ogni caso tale soluzione garantirebbe comunque un impatto ambientale complessivamente minore.

I veicoli elettrici hanno complessivamente una maggiore efficienza energetica rispetto a quasi tutti i motori a combustione interna. Un motore a benzina ha una efficienza energetica del 25%, un diesel si avvicina al 40%, mentre un motore elettrico a induzione in corrente alternata ha un'efficienza del 95%. Grazie alla elevata coppia prodotta dai motori elettrici, i veicoli elettrici hanno buone prestazioni in accelerazione, tali in alcuni casi anche da superare

i veicoli convenzionali alimentati a benzina. Inoltre, non essendo dotati di motore che brucia combustibile liquido e dei conseguenti apparati necessari al suo funzionamento, sono enormemente più affidabili e richiedono una manutenzione estremamente minima.

Il tentativo di ottenere sistemi di trasporto che sfruttino l'energia elettrica come fonte di energia risale addirittura ai primi dell'ottocento. Effettivamente il motore a combustione era assai rumoroso e difficile da far funzionare, per cui finché alla fine del secolo non furono scoperti i giacimenti di petrolio non è difficile immaginare che il motore elettrico era la via più battuta. Nel 1837 l'americano Thomas Davenport brevettò un rudimentale veicolo a motore elettrico costituito da una elettrocalamita. Fecero seguito altri esperimenti, agevolati anche dall'invenzione della batteria al piombo-acido di Gaston Planté nel 1859. Già la tecnologia di fine '800 permise al pilota belga Camille Jenatton di superare con un'auto elettrica lo storico traguardo dei 100 Km/h.

La principale causa che ha negato un vero sviluppo di mezzi di questi tipi è stata la loro scarsa autonomia legata alle batterie, problema che ancora al giorno d'oggi si è costretti a porsi. Tuttavia a partire dagli anni '60 ricominciarono a circolare progetti e proposte di auto elettriche, sotto la spinta del pericolo di inquinamento causato dai gas di scarico

Con il recente sviluppo dell'elettronica e soprattutto le novità tecnologiche appostate alle batterie, rese più efficienti sotto ogni punto di vista, gli ultimi anni hanno visto i veicoli elettrici diventare sempre di più una valida alternativa per il settore dei trasporti. Sebbene il progresso di questa categoria di veicoli intesi, al trasporto di persone nell'uso quotidiano, trovi qualche difficoltà nel diffondersi e al fare partire una produzione industriale vera e propria, essi traggono comunque vantaggio dagli avanzamenti tecnologici che si stanno realizzando in altri mercati sotto certi aspetti affini, come quello dei telefoni cellulari, dei computer portatili o dei veicoli ibridi. Di particolare interesse è ad esempio la ricerca di nuove tecnologie per le batterie.

Oltre al mercato dell'auto, la tipologia elettrica è diffusa anche piccoli autocarri, carrelli elevatori, veicoli per campi da golf, scooter e biciclette. In tutti questi ultimi il motore elettrico è anzi l'ideale in quanto le distanze da percorrere sono in genere brevi.

Il futuro dei veicoli elettrici è dunque legato in primo luogo alle batterie, alla loro densità energetica e potenza disponibile, e alla loro durata di vita. In secondo luogo possiamo elencare lo sviluppo di motori più leggeri ed economici, lo sviluppo di nuovi sistemi di controllo e caricabatterie più performanti ed affidabili.

Sono già molte fra le principali case automobilistiche ad avere già sviluppato prototipi di auto elettriche ed avere già annunciato il loro lancio nel mercato, quali ad esempio

l'americana General Motors e le giapponesi Mitsubishi, Subaru e Toyota, il che suggerisce che molto presto vi sia la possibilità di una sua improvvisa espansione .

1.2 Sviluppo attuale e mercato E-bike

Nella società moderna, in cui la maggior parte delle persone è totalmente assuefatta dall'uso dell'automobile, la bicicletta assume un ruolo di primo livello tra i possibili esempi di mobilità alternativa. La bicicletta è un mezzo salutare e divertente, e ci permette di evitare i ben noti problemi traffico, stress da parcheggio, oltre alla ovvia produzione di inquinamento.

Nei paesi europei quali Germania, Francia, Olanda e Danimarca il problema della mobilità è preso in gran considerazione, e ne è testimone il fatto che la bicicletta è diffusissima. La riduzione dei costi dei componenti elettronici e il notevole sviluppo degli accumulatori ha permesso nell'ultimo decennio l'affacciarsi sul mercato della bicicletta elettrica (E-bike). Essa costituisce un mezzo comodissimo, che si può benissimo sostituire nell'uso quotidiano ai ciclomotori o anche all'auto, considerando che spesso in un percorso urbano una bicicletta si sposta più agilmente e con risparmio di tempo. Inoltre è esente dai costi di bollo e assicurazione.

Come per i veicoli elettrici la storia della e-bike parte da lontano, e già nei primi del '900 si tentò di progettare i primi esemplari. Dobbiamo aspettare il 1946 anno in cui Benjamin Bowder presenta la sua "Spacelander" (fig. 1.1), una bicicletta elettrica dal design sorprendentemente avveniristico e dotata anche di una raffinata tecnologia, che prevedeva anche il recupero dell'energia durante le discese.

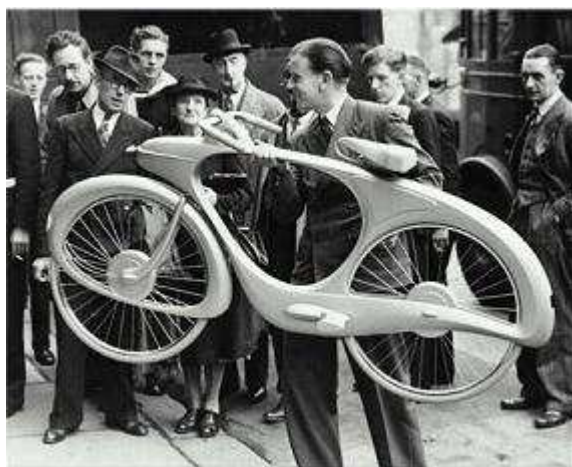


Fig. 1.1

Sarà verso la metà degli anni '80 ed inizio degli anni novanta, con la realizzazione delle batterie al piombo sigillate e con l'arrivo delle più leggere nichel-cadmio che si poterono finalmente costruire biciclette elettriche del tutto simili a quelle di oggi. I primi modelli piuttosto rudimentali cominciarono a circolare in Giappone prodotti da Yamaha, per poi cominciare la produzione dal 1994; in Europa la Svizzera Biketec inizia la sua produzione nel 2001 con il marchio Flyer. Nello stesso periodo anche altri produttori affermati iniziano la loro commercializzazione avviando per la prima volta la diffusione in Italia.

Al giorno d'oggi siamo assistendo alla fase di maggiore espansione del mercato delle e-bike, mercato che peraltro è tutt'ora in aumento. In Olanda, come pure in altri paesi europei, siamo nel pieno boom. Ad un congresso tenuto dall'associazione dei concessionari olandesi tenuto nel 2007, un'indagine di mercato ha rilevato che le vendite di biciclette elettriche sono aumentate del 63% in un anno, e in nove mesi da gennaio a settembre ne sono state vendute all'incirca 32.000. Negli anni successivi le vendite sono aumentate ulteriormente, complice anche l'incremento dei prezzi delle moto.

La British Electric Bike Association (BEBA), formatasi di recente, ha previsto una grossa crescita del mercato britannico delle e-bike per il 2010, con un ulteriore aumento delle vendite nell'anno successivo. "Siamo consapevoli che le vendite sono passate da 15.000 nel 2008 a oltre 20.000 nel 2009 e con molta probabilità prevediamo che nel Regno Unito arriveremo a quota 30.000 nel 2010", queste le parole del segretario e co-fondatore BEBA Mark Loveridge.

La Cina è un enorme produttore di biciclette elettriche, tanto che l'uso di quest'ultima ha sorpassato l'uso dell'automobile. Si calcola che nel 2008 i cinesi hanno circa 21 milioni di e-bike, confrontati con i 9,4 milioni di auto. Attualmente il numero di biciclette elettriche circolanti è pari a quattro volte quello delle auto. Grazie ad accurate incentivi del governo e ad una popolazione già di per se molto propensa nell'uso delle due ruote per gli spostamenti, la Cina ha assunto il ruolo di leader mondiale del mercato dei "veicoli verdi" a basso costo.

Al pari degli ingegneri di tutto il mondo che si stanno impegnando nel produrre veicoli eco-compatibili, la Cina si è ben avvantaggiata in questa corsa.

1.3 Caratteristiche principali E-bike

Passiamo ora ad analizzare in dettaglio quali sono le principali caratteristiche di una bicicletta elettrica, giustamente rinominata anche *bicicletta a pedalata assistita* (o *pedelec*), soffermandoci sul funzionamento dei suoi componenti elettrici ed elettronici. Una bicicletta

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

elettrica è del tutto simile ad una tradizionale bicicletta, con l'aggiunta di essere equipaggiata con un motore elettrico (di solito installato sul mozzo di una ruota) alimentato da una batteria, che si somma all'azione propulsiva umana per dare un notevole sostegno alla marcia.

Il termine “pedalata assistita” deriva dal fatto che l'azione del motore interviene solo ed esclusivamente quando si sta effettivamente pedalando, consentendoci di fare meno fatica di quanta se ne farebbe con una bicicletta tradizionale. La direttiva europea 2002/24/CE del 18 marzo 2002, relativa all'omologazione dei veicoli a motore a due o tre ruote, definisce (nell'articolo 1, punto h) la bicicletta a pedalata assistita come una “bicicletta dotata di un motore elettrico ausiliario avente potenza nominale continua massima di 0,25 kW la cui alimentazione è progressivamente ridotta e infine interrotta quando viene raggiunta la velocità di 25 Km/h o prima se il ciclista smette di pedalare”.

Ai veicoli che soddisfano questa direttiva sono considerati a tutti gli effetti come le biciclette tradizionali e non richiedono l'omologazione. Se invece il veicolo non soddisfa anche uno solo di questi requisiti non può venire considerato come una bicicletta e pertanto richiede di essere omologato e immatricolato. Questa direttiva è attualmente in vigore in Italia con il decreto del 31 gennaio 2003 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Affinché il motore si avvii effettivamente solo durante la pedalata, è presente un apposito sistema denominato P.A.S. (pedal assist system) costituito da appositi sensori, la cui presenza è assolutamente necessaria per rendere legale una bici elettrica.

Il motore utilizzato è un *brushless*, e nello specifico viene usata quasi esclusivamente la tipologia DC-brushless per motivi di costo. Una trattazione completa ed esauriente in riguardo verrà data nel prossimo capitolo. Il motore può essere installato indifferentemente sul mozzo della ruota posteriore o anteriore, a seconda delle esigenze di progetto. In genere, se installato sulle ruota posteriore può essere un vantaggio in termini di sicurezza e affidabilità di guida, in quanto il peso del motore stesso non incide nelle manovre di sterzo.

Tuttavia in questo caso bisogna considerare che il motore dovrà essere sufficientemente compatto per non creare problemi alla linea catena (si consideri che nella ruota posteriore è presente anche il pacco pignoni del cambio).

Di fondamentale importanza è la presenza di una centralina di controllo che gestisce tutte le parti elettriche. Essa viene direttamente alimentata dalla batteria, e il suo compito principale è quello di fornire al motore le forme d'onda di corrente opportune per azionarlo qualora venga ricevuto il segnale dal sensore di pedalata. Inoltre gestisce altre funzioni quali il controllo dei sensori di frenata, in modo tale che l'erogazione di corrente al motore si interrompa appena le leve freno vengono azionate. La loro presenza è utile anche per evitare

partenze involontarie quando si è fermi. Infine gestisce dispositivi supplementari di monitoraggio, ad esempio l'indicatore di carica delle batterie.

Passiamo infine ad una breve analisi sulle batterie. Le batterie, come in qualsiasi altro veicolo elettrico, costituisce senza dubbio un elemento essenziale che determina gran parte delle prestazioni finali del veicolo. Inoltre le batterie incidono in larga misura sul costo totale, tanto che spesso in base al tipo di batteria installata viene fatta una diversificazione di mercato. Si possono dividere inizialmente in due categorie: di tipo primario o di tipo secondario. Le primarie non sono ricaricabili, ovvero non è possibile invertire la reazione chimica sulle quali sono basate e accumulare energia, e quindi si possono utilizzare una volta sola. Fanno parte di questa categoria tutte le pile alcaline.

Le batterie che prenderemo in considerazione saranno quelle di tipo secondario, o accumulatori, nelle quali è possibile effettuare la ricarica per poterle riutilizzare.

Proprietà e qualità di un accumulatore possono essere esaminati attraverso una serie di parametri caratteristici, tra i più importanti dei quali troviamo:

- Tensione: si misura in volt (V) ed è riferita alla tensione nominale ai capi degli elettrodi. L'accumulatore è costituito da più elementi (celle) collegati in serie, per cui la tensione dichiarata è in realtà la somma delle tensioni di ogni singolo elemento
- Capacità: insieme alla tensione è il parametro più comunemente fornito dai costruttori, e rappresenta la quantità di carica elettrica che complessivamente la batteria può fare circolare durante il periodo di scarica completa, e si misura in Ampere·ora (Ah). Da quindi una misura di quanto può durare la scarica in relazione all'intensità di corrente emessa. Ad esempio, una batteria con una capacità di 10Ah è in grado di fornire una corrente di 10A per un'ora, oppure 5A per due ore e così via. In realtà la capacità reale è molto dipendente dal tasso di scaricamento, decrescendo con l'aumento della corrente richiesta.
- Ciclicità: è il grado di scarica che può subire, e viene espressa con un valore percentuale; nelle applicazioni di trazione vengono adoperate batterie dette deep-cycle, dove la batteria è impiegata fino all'80% della propria carica
- Densità di energia: è la quantità di energia espressa in wattora dalla batteria, messa in relazione al suo peso (Wh/Kg); è chiaramente un fattore

estremamente importante nei casi in cui si voglia ottenere un alto livello energetico contenendo il peso

- Durata di vita: il numero di volte che la batteria può essere ricaricata (cicli utili). Varia sensibilmente a seconda del tipo di chimica della batteria. Spesso i costruttori forniscono come dato il numero di cicli di carica-scarica che è possibile effettuare prima che la capacità diminuisca dell'80%.
- Tempo di ricarica: Se si indica con C la capacità della batteria e A la corrente fornita dal caricabatteria, il tempo T è dato da C/A . Ad esempio, per caricare una batteria da 10Ah con un caricabatteria da 1A, occorrerà un tempo T di 10 ore. In genere il tempo reale di ricarica è almeno il 10% più lungo, a causa dei processi dissipativi interni alla batteria che sviluppano calore nel momento della ricarica.

Tutte queste proprietà variano sensibilmente a seconda del tipo di batteria, ovvero del materiale di cui sono costituite e quindi della reazione chimica che le caratterizza. Le tipologie più utilizzate sono le batterie al piombo, le nichel-metal idrato e le batterie al litio.

I primi accumulatori utilizzati sono stati quelli al piombo. Essi hanno il vantaggio di essere economici, con una tecnologia ben collaudata; sono particolarmente robuste e non richiedono particolari attenzioni di manutenzioni. Inoltre presentano un basso tasso di autoscarica, ovvero la perdita spontanea di carica quando lasciate per lungo tempo inutilizzate. La durata di vita è intorno ai 200-300 cicli (80%).

Come svantaggi le batterie al piombo presentano una bassa densità di energia, con un peso molto elevato in relazione alla capacità e un volume d'ingombro dell'intero pacco considerevole. In applicazioni come le biciclette dove il peso è un fattore molto rilevante, questi svantaggi si fanno sentire.

Successivamente iniziarono a venire introdotte in sostituzione le NiMH, che garantiscono più leggerezza e potenza rispetto ai modelli al piombo e maggior durata di vita; gli svantaggi sono dovuti al fatto che le NiMH presentano rispetto alle precedenti sono una autoscarica più pronunciata e la necessità di manutenzione più accorta (sono infatti più sensibili alla temperatura e soffrono le ricariche mal eseguite). Inoltre hanno lo spiacevole inconveniente dell'effetto memoria; è un fenomeno che si manifesta nel caso di scarica parziale della batteria, che ne impedisce la completa utilizzabilità successiva.

Grazie allo sviluppo delle batterie per laptop e cellulari, al giorno d'oggi è possibile applicare anche ai veicoli elettrici batterie al litio, con un notevole miglioramento sulle prestazioni. Le batterie al litio sono state un grosso passo avanti per la ricerca, in quanto possiedono molti vantaggi rispetto agli altri modelli. Sono innanzitutto più leggere a parità di capacità, quindi presentano un'elevata densità di energia (un accumulatore al litio può arrivare a pesare anche un quarto di uno della stessa capacità al piombo). Le celle che la costituiscono sono sottili, assomigliano come misure ad una scheda o una carta di credito, per cui il pacco non ha particolari problemi ad assumere svariate forme e non si è limitati a certe disposizioni standard delle celle. Altro grosso vantaggio è la maggiore durata di vita. Gli unici svantaggi che presentano sono inevitabilmente il costo, superiore a tutti gli altri, e il degrado nel caso non vengano utilizzate per lungo tempo. Infine uno dei difetti della tecnologia al litio è il fatto di dover utilizzare caricabatterie specifici, per evitare incendi o esplosioni.

Esistono in commercio sostanzialmente due tipi: la batteria agli ioni di litio (Li-ion) e la batterie litio-polimero (Li-poly). Queste ultime sono una evoluzione delle prime: l'elettrolita non è contenuto in un solvente ma si trova in un composto solido. Questo rappresenta un vantaggio dal punto di vista dell'affidabilità e sicurezza, in quanto il polimero solido non è infiammabile e quindi le batterie non corrono rischi se vengono danneggiate. Inoltre la durata di vita delle Li-poly è nettamente superiore, con 1000 cicli contro i 500 delle Li-ion.

1.4 Caratteristiche del prodotto esaminato

Nel periodo in cui è stato svolto il tirocinio la produzione di biciclette elettriche si differenzia in tre modelli:

- Modello femminile, con ruota da 26"
- Modello femminile, con ruota da 28"
- Modello pieghevole, con ruota da 20"

Le nostre analisi sono state concentrate nel primo modello citato, riportato in fig. 1.2



Fig. 1.2

Come si può notare, la bicicletta è caratterizzata da un ottimo design e presenta una qualità complessiva medio alta, adottando alcune soluzioni di qualità come la forcella ammortizzata. Il telaio è in alluminio, formato da due tubi saldati a formare un monotubo.

La batteria è di tipo Li-ion, con una tensione nominale del pacco di 25.9 V e capacità di 10.5 Ah. Nel totale ha una buona leggerezza, pesando circa 3.6 Kg ed assicura una buona autonomia (oltre 30 Km con una ricarica). È stata posizionata nel telaio in posizione verticale sotto la sella, posizione che praticamente non altera la ciclistica del mezzo. In alcuni modelli (più costosi) vengono dotate di accumulatori Li-poly, più leggeri e compatti e quindi posizionabili tranquillamente nel portapacchi posteriore.

Il motore DC-brushless, 25.9V e 250 W di potenza, è posizionato sulla ruota anteriore. All'interno del mozzo viene installato un sistema di rotismi epicicloidali, affinché si permetta alla ruota di girare nella normale marcia ed anche quando il motore dà il suo contributo di spinta.

La centralina di controllo (controller) non è visibile nella foto in quanto è posizionata in una scatola sotto al telaio, con un vantaggio per l'estetica così come lo sono i diversi cavi che vengono fatti passare all'interno del telaio.

2 Analisi Motore e descrizione azionamento

2.1 Richiami ai motori brushless

2.1.1 Caratteristiche principali

I motori sincroni a magneti permanenti e a commutazione elettronica, brevemente detti anche *brushless*, sono diventati in tempi relativamente recenti fra le più diffuse macchine elettriche impiegati in tutti i settori dell'automazione, specialmente in ambito industriale e nel campo della robotica in azionamenti di piccola e media potenza ma anche in varie applicazioni domestiche.

Il loro crescente utilizzo è legato agli indubbi pregi che essi introducono rispetto ai tradizionali motori a corrente continua o ai motori ad induzione; fra i principali vantaggi possiamo in prima battuta elencare l'elevata densità di potenza, i volumi ridotti e la facilità di controllo, caratteristiche che rendono spesso il motore brushless destinato ad azionamenti in cui siano richieste elevate prestazioni.

Sostanzialmente esso è costituito da uno statore dove ha sede l'avvolgimento di eccitazione, tipicamente trifase connesso a stella, e da un rotore dotato di magneti permanenti.

Il termine brushless significa letteralmente "senza spazzole". In questo tipo di motore infatti non è necessario il sistema di contatti striscianti su lamelle solidali al rotore (spazzole-collettore) tipico dei motori a corrente continua: l'avvolgimento di eccitazione posto sul rotore viene quindi sostituito con un insieme di magneti permanenti, in grado di instaurare un campo magnetico al traferro del tutto simile a quello prodotto da un avvolgimento.

Come in tutti i motori, il principio di funzionamento che seguono è quello dei *sistemi elettrodinamici*, che si basa sull'interazione fra conduttori percorsi da corrente e campi magnetici (in questo caso creati dai magneti permanenti): lo scopo è quello di produrre una coppia sul rotore tale da metterlo in rotazione e produrre il lavoro.

Caratteristica fondamentale e aspetto principale di un motore brushless è il suo necessario sistema di alimentazione e controllo elettronico. Essendo infatti privo del sistema spazzole-collettore che garantiva la "commutazione meccanica" della corrente, si intuisce quindi che essa deve avvenire elettronicamente.

I principali vantaggi offerti dai motori brushless sono:

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

- Assenza dell'effettuare una costante manutenzione delle spazzole e del collettore di commutazione per l'usura di questi dopo un certo periodo. Le spazzole inoltre hanno l'inconveniente che possono creare archi elettrici (scintille), che in certe zone pericolose possono non essere ammesse. Infine possono creare disturbi in radiofrequenza.
- Sistema complessivamente più leggero, con un momento d'inerzia sensibilmente inferiore e più elevate accelerazioni e velocità
- Maggiore sezione trasversale disponibile per l'avvolgimento di potenza, con conseguente miglioramento della conduzione del calore
- Minore riscaldamento, dovuto alle sole perdite di statore (nel rotore non vi sono avvolgimenti)
- Induttanze minori, a causa della bassa permeabilità magnetica dei magneti permanenti
- Mancanza di corrente di magnetizzazione allo statore, e quindi maggiore resa

Per contro gli svantaggi invece sono sostanzialmente legati ai costi che possono risultare elevati. Una delle cause è la presenza di magneti permanenti di pregio nel rotore; inoltre avrà un certo costo anche la struttura elettronica che gestisce alimentazione e controllo della macchina.

Tuttavia, in tempi relativamente recenti, con l'avvento di componenti elettronici di potenza con prestazioni e affidabilità sempre maggiori e contemporaneamente lo sviluppo di sistemi di alimentazione e di controllo più economici ha in parte limitato il problema dei costi.

Inoltre in tempi ancora più recenti lo sviluppo di nuovi materiali per i magneti permanenti e la diminuzione dei loro costi ha consolidato il successo di questo tipo di macchine.

Come già accennato, i motori brushless sono stati inizialmente progettato per servoazionamenti e robotica, ma il loro campo di applicazione è in continuo aumento. Un settore importante in cui stanno prendendo un largo impiego è nelle applicazioni di trazione; ne sono un esempio i veicoli stradali totalmente elettrici quali E-scooter e E-bike. Altro campo recentissimo e in continua espansione è quello relativo ai sistemi di trazione ibrida, che prevedono l'affiancamento ai tradizionali motori endotermici di un motore elettrico.

Non essendo necessaria una continua manutenzione, il motore brushless è perfetto per le applicazioni di lunga durata o continue. Viene infatti spesso installato in sistemi di pompaggio o in sistemi di condizionamento.

La continua ricerca e la diminuzione di costi e dimensioni, ha aperto infine un'altra strada, quella dei minimotori brushless. Queste macchine sono pensate per azionamenti di piccolissima potenza, addirittura da qualche centesimo di Watt, fino al massimo ad una decina. Vengono utilizzati ad esempio in strumentazioni medicali e attrezzature da laboratorio di precisione (elettrocardiografi, artroscopia, bilance di precisione); nel campo audio/video (macchine per riprese cinematografiche, lettori di microfilm, videoregistratori); nel campo del modellismo (aeromodellismo e modellismo di qualità); in azionamenti per sistemi di uso domestico (veneziane, ventilatori).

2.1.2 Struttura e principio di funzionamento

In questo paragrafo viene presentato il principio di funzionamento generale di un azionamento con motore brushless. Partiamo prima con la descrizione della struttura del motore in sé nelle sue due parti fondamentali, ovvero lo statore e il rotore.

In fig. 2.1 è illustrato uno schema della struttura di un motore brushless a due poli. La fig. (a) mette in evidenza l'induzione al traferro prodotta dai magneti di rotore, mentre la (b) l'induzione al traferro prodotta dagli avvolgimenti di statore (in questo caso sinusoidale).

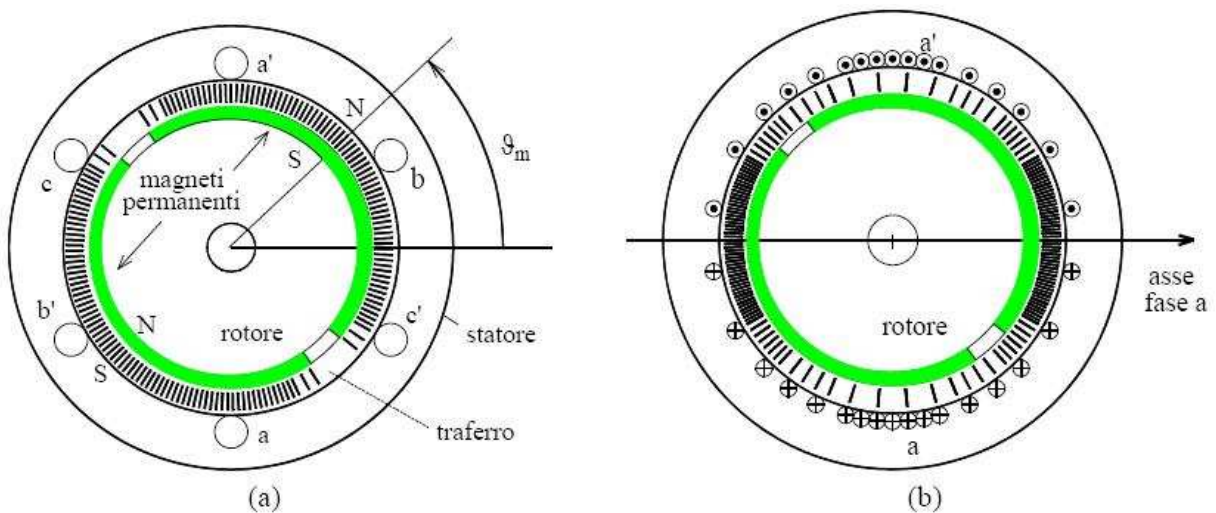


Fig. 2.1

Lo statore è la parte fissa del motore; esso è di forma corona cilindrica, e fatto di materiale ferromagnetico laminato o massiccio. Spesso si preferisce laminato per motivi di costo. La sua funzione è quella di essere sede dell'avvolgimento, con il quale il motore viene alimentato. L'avvolgimento è una parte molto importante, e a seconda della sua tipologia e

struttura si andrà a caratterizzare l'intero motore. Esso è distribuito lungo le cave statoriche, ricavate lungo la generatrice del cilindro di statore.

Quando alimentato, l'avvolgimento di statore produce un campo magnetico che va ad interagire con i magneti sul rotore: è in questo modo che si riesce a mettere in rotazione il rotore e a produrre quindi il moto.

I primi motori furono progettati per semplicità con avvolgimenti monofase; questi presentavano però lo svantaggio di dover essere messi inizialmente in moto da mezzo meccanico esterno. Si passò quindi ad avvolgimenti polifase, in cui le fasi sono spazialmente sfasate tra loro sulla superficie dello statore di un opportuno angolo. Vennero progettati ad esempio avvolgimenti bifase con le due fasi sfasate tra loro di 180° , oppure avvolgimenti trifase con fasi reciprocamente sfasate di 120° . In questo modo si assicura che vi sia sempre coppia in qualunque posizione si trovi il rotore. Per ragioni di costo si tende a limitare il numero di fasi da 3 a 6.

Individuando un'analogia con il motore in corrente continua, possiamo pensare ad una fase come all'equivalente di un segmento di collettore. Un elevato numero di fasi, nel tentativo di rispettare questa equivalenza, andrebbe sostanzialmente a complicare l'elettronica aumentando il numero di componenti utilizzati ovvero diodi e transistor, come si avrà modo di verificare nei paragrafi successivi. Nella pratica, la tipologia più usata è quella trifase, con gli avvolgimenti collegati a stella.

Il rotore è la parte rotante del motore; anch'esso di forma cilindrica, di materiale ferromagnetico laminato. Da quanto intuito finora, ciò che caratterizza maggiormente il rotore sono i magneti. A seconda della loro disposizione e della forma del rotore, si possono ottenere strutture di rotore isotrope o anisotrope.

Nel primo i magneti sono disposti sulla superficie del rotore, e il motore viene per questo motivo denominato SPM (*surface permanent magnet*). Nel secondo caso i magneti sono "sepolti", ovvero posizionati all'interno del cilindro di rotore in senso radiale; questa tipologia viene dunque nominata IPM (*interior permanent magnet*). Rispetto alla struttura isotropa, nei IPM si ha un'inerzia del 20...30% maggiore e una maggiore induttanza, ma offrono un leggero vantaggio nel costo grazie all'uso di barrette magnetiche standard, al montaggio in maniera automatica e all'eliminazione della fasciatura.

Statore e rotore sono separati da un *traferro* in aria, che altro non è che uno spazio vuoto interposto tra i due.

In figura 2.2 viene illustrato lo schema generale di un azionamento con motore brushless.

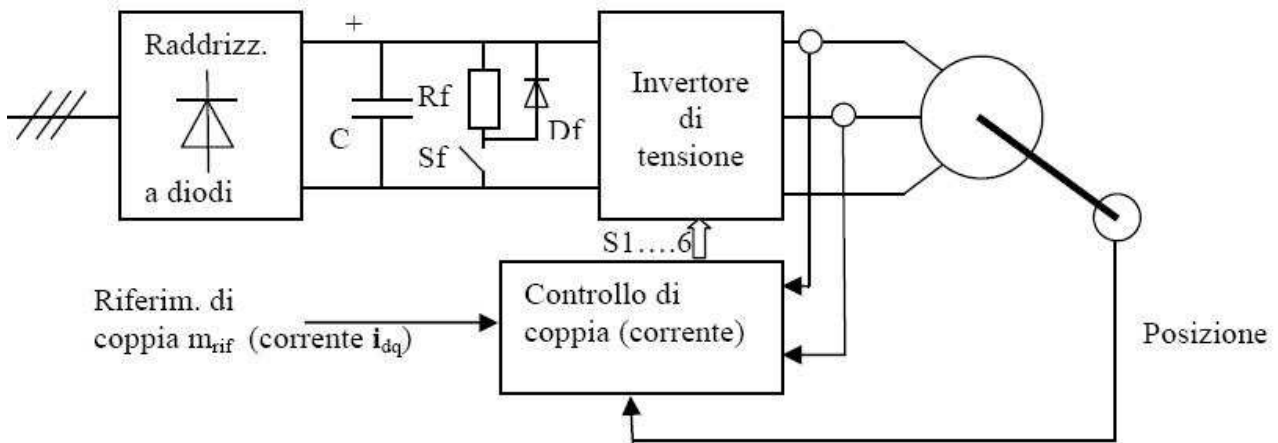


Fig. 2.2

La sorgente di alimentazione è solitamente la rete trifase di distribuzione; da essa possiamo ottenere una tensione continua U_{dc} mediante raddrizzatori a diodi configurati nei classici schemi (ad esempio a ponte di Graetz). Spesso in molte applicazioni, ad esempio in azionamenti portatili di piccola potenza o applicazioni di trazione, l'alimentazione viene fornita tramite accumulatori (batterie) che erogano già di per sé una tensione continua. La tensione U_{dc} andrà quindi ad alimentare il blocco invertitore di tensione (o inverter). L'inverter (nel nostro caso trifase) è un convertitore statico che trasforma la tensione continua in tre tensioni alternate, di cui è possibile regolare la frequenza e l'ampiezza, che saranno poi le tensioni di fase che alimentano il motore. Già qui si intuisce quindi che la funzione dell'inverter è simile a quella del sistema del sistema spazzole-collettore del motore in corrente continua. I comandi di controllo dell'inverter provengono dal blocco controllo di coppia. Per un controllo di coppia corretto ed efficace (che come scopriremo più avanti si traduce nel controllare le correnti) occorre disporre, oltre che il riferimento di coppia m_{rif} , la misura della posizione angolare del rotore e la misura delle correnti di fase.

La posizione si ottiene in genere tramite trasduttori di posizione, come ad esempio encoder incrementali o assoluti, resolver o trasduttori di posizione ad effetto Hall. La misura delle correnti, effettuata tramite shunt o trasformatori amperometrici, può essere eseguita solo su due fasi, potendo ricavare il valore della terza dal principio di Kirchhoff come somma delle prime due cambiata di segno (nei sistemi bilanciati $i_a+i_b+i_c=0$), risparmiando un componente. Il riferimento di coppia proviene spesso da un anello di velocità che elabora l'errore di velocità e la velocità misurata sul motore.

Nella figura, fra raddrizzatore e inverter (bus in continua) sono connessi il condensatore C di livellamento della tensione raddrizzata e il sistema di dissipazione di

energia in frenatura. Quest'ultimo è costituito da una resistenza R_f , un diodo D_f e un interruttore S_f . Ogniqualevolta il motore sia in frenata, si comporta come un generatore e trasferisce energia verso l'alimentazione, che andrebbe ad accrescere troppo la tensione sul condensatore essendo il raddrizzatore unidirezionale: nel verificarsi di questa situazione l'interruttore si chiude connette la resistenza ai capi del bus in continua in modo da dissipare l'energia eccessiva.

Possiamo suddividere i motori brushless in due tipologie principali: AC-brushless (alternate current), detto anche brushless *sinusoidale*, e DC-brushless (direct current), o brushless *trapezoidale*. La distinzione riguarda fundamentalmente due aspetti, che sono la distribuzione degli avvolgimenti di fase nello statore e le forze contro elettromotrici indotte in essi, i quali per altro sono legati tra loro.

Negli AC-brushless il campo magnetico indotto al traferro ha andamento di tipo sinusoidale: questo è possibile grazie alla particolare distribuzione dei conduttori di ciascuna fase, che per l'appunto è approssimativamente sinusoidale. A conseguenza di ciò, la forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti, che abbreviamo con *f.c.e.m.*, sarà anch'essa sinusoidale.

Nei DC-brushless invece, il campo al traferro ha un andamento ad onda quadra, e la *f.c.e.m.* indotta negli avvolgimenti ha il tipico andamento trapezoidale. I conduttori di ciascuna fase sono distribuiti in maniera concentrata in determinate zone; nel complesso le cave della struttura sono tutte equidistanti tra loro. D'ora in avanti proseguiremo la trattazione focalizzandoci su questi motori, che sono stati presi in esame.

2.2 Principio di funzionamento dei motori DC-brushless

2.2.1 Struttura e principio di funzionamento

Come già accennato nel precedente paragrafo, questi motori si distinguono per la particolare forma trapezoidale delle forze contro elettromotrici. La ragione principale della loro popolarità risiede nella semplicità di controllo, maggiore rispetto agli AC. Un'elettronica meno complessa si traduce in un minore numero di componenti utilizzati e quindi un minore costo. Inoltre, a parità di caratteristiche meccaniche e alimentazione, i DC presentano in generale una densità di potenza più elevata (attorno al 15% in più), dovuto al fatto che il rapporto tra valore medio e valore di picco della densità di flusso è più alta in questi ultimi.

La fig. 2.3 mostra una sezione della struttura di un motore DC-brushless.

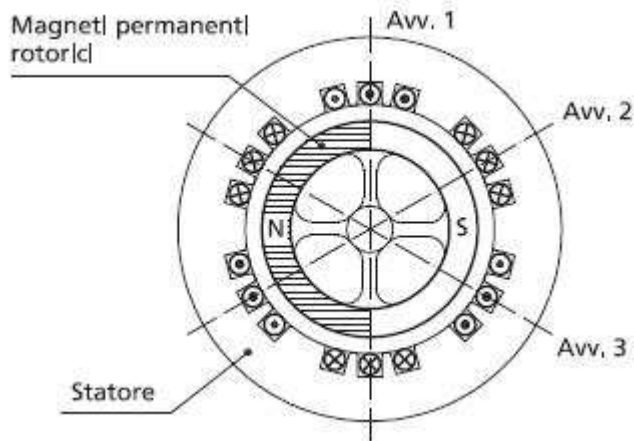


Fig.2.3

L'esempio in questione presenta 18 cave, in ognuna delle quali ci sono conduttori di una sola fase (il pallino significa corrente uscente dal conduttore, la croce corrente entrante). Si noti come le fasi siano reciprocamente sfasate nello spazio di 120° , e ognuna di esse sia concentrata in una determinata zona. Dato che le fasi sono tre e in ogni cava vi sono i conduttori di una sola fase, per ogni fase si occupano 6 cave, 3 per una polarità e 3 per l'altra. Ogni avvolgimento è costituito da 3 matasse adiacenti ognuna composta da un certo numero di spire, i cui assi sono reciprocamente sfasati di 20° . Tuttavia il numero di cave può variare e possono essere ad esempio 9, 12 o 15, a seconda delle esigenze costruttive (ovviamente per avvolgimenti trifase saranno comunque in numero multiplo di tre)

Nella caratteristiche del rotore, un dato significativo è rappresentato dal numero di poli p o, in maniera equivalente, dal numero di coppie polari $c_p=2p$. Non necessariamente i rotori devono essere a 2 poli, ma nella trattazione che segue spesso faremo riferimento per semplicità a questo tipo. Valori tipici maggior parte delle applicazioni sono 4, 6, 8 poli, ma il numero può arrivare anche a 20 specie nelle applicazioni con rotore esterno.

Affinché sia possibile ottenere le f.c.e.m. volute, si deve realizzare una induzione magnetica al traferro il più possibile ad onda quadra. In base a ciò, ciascun magnete disposto sulla superficie del rotore dovrebbe ricoprire interamente un passo polare; nella pratica i magneti vengono costruiti in modo che riescano a ricoprire circa il 90% di esso. Le tipologie costruttive più utilizzate per le strutture rotoriche sono a tegole magnetiche incurvate o a sbarrette magnetica, che assicurano buoni risultati. Per garantire la tenuta meccanica, i magneti essi vengono incollati al rotore e in alcuni casi successivamente trattenuti tramite bandaggi. Le tegole magnetiche sono caratterizzate da una maggiore tenuta meccanica,

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

tuttavia presentano lo svantaggio dovuto al fatto che una volta costruiti non possono venire applicati a rotori di diametri diversi in quanto il raggio di curvatura rimane fissato.

Una volta assicurata la condizione per cui i magneti ricoprono interamente il passo polare, e sotto le ipotesi di permeabilità magnetica differenziale dei magneti simile a quella dell'aria e di permeabilità magnetica dei circuiti in ferro di statore e di rotore infinita, il traferro risulta costante e uguale alla differenza radiale tra il ferro di statore e di rotore. Idealmente si può ritenere costante su tutta la superficie di traferro coperta dal magnete e quindi rappresentarla come un'onda rettangolare.

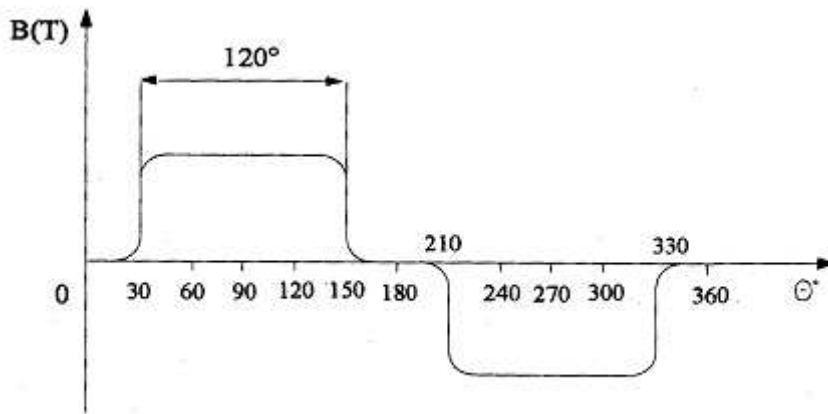


Fig. 2.4

La figura 2.5 illustra il principio di funzionamento di un motore trapezoidale a due poli, evidenziando le modalità di creazione del moto rotorico in riferimento alle correnti di fase imposte dal pilotaggio dell'inverter. Denominiamo i tre avvolgimenti di fase con a, b, c.

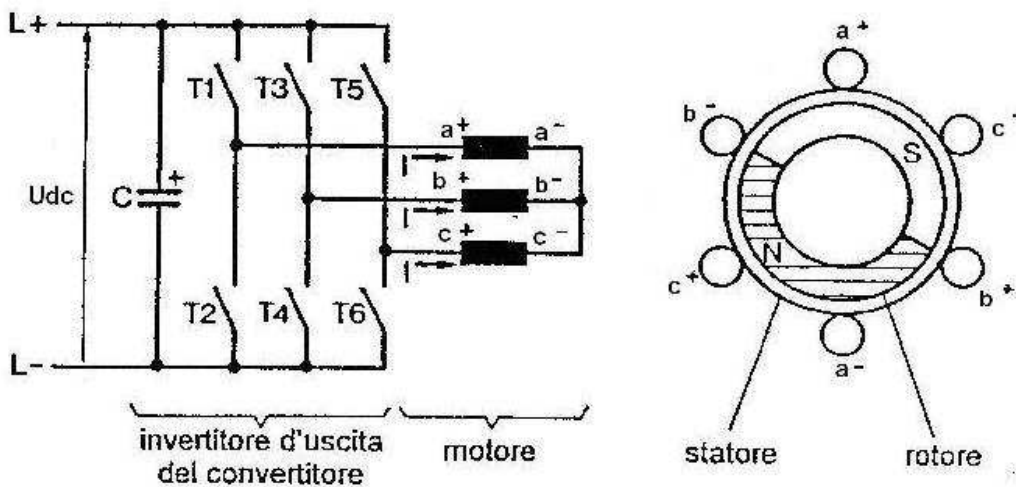
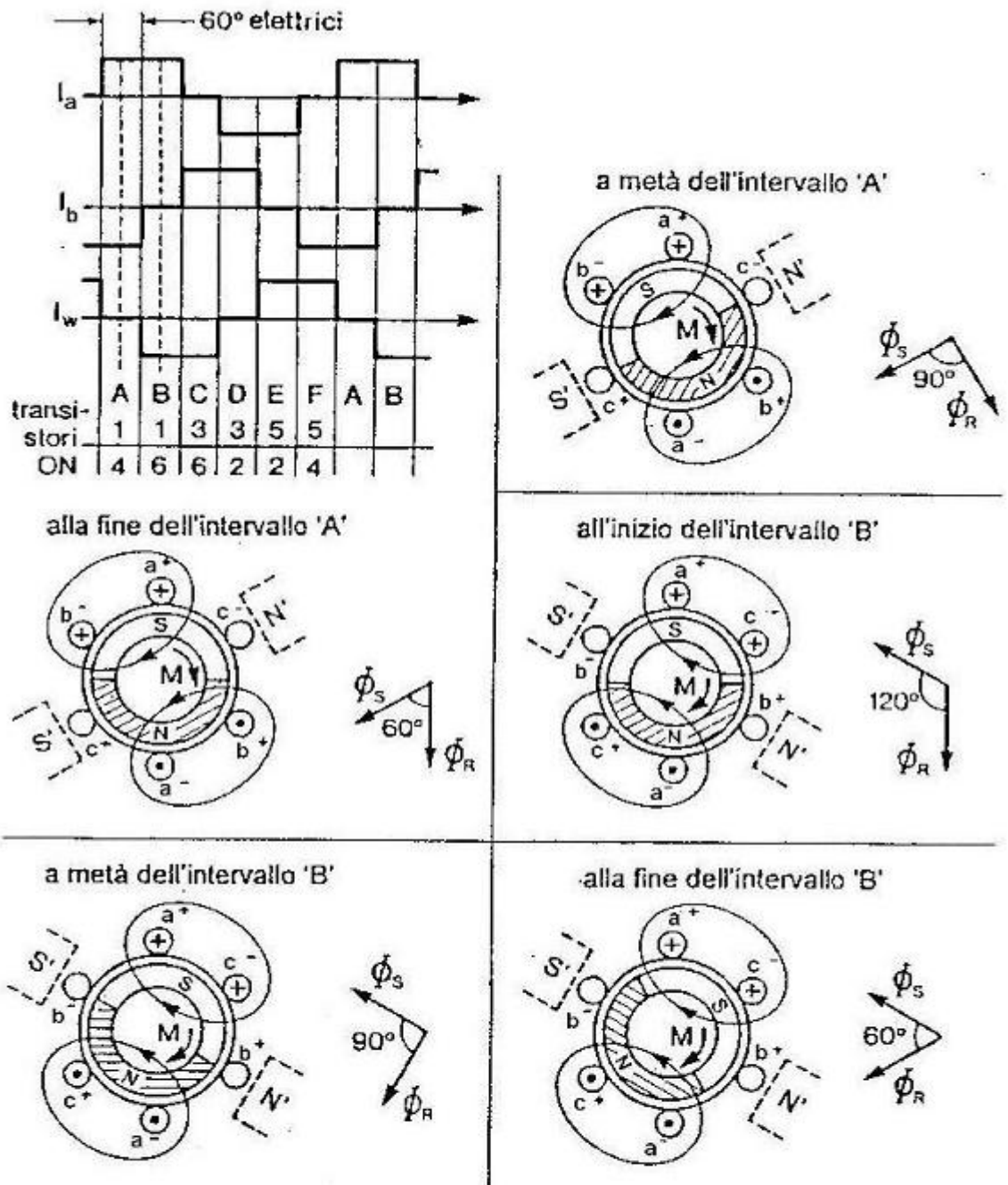


Fig. 2.5 (a)



- Principio di funzionamento del motore trapezoidale.

- a^+ - inizio della fase a ;
- a^- - fine della fase a ;
- $+ -$ corrente entrante nel conduttore;
- $\bullet -$ corrente uscente dal conduttore;
- Φ_S - flusso magnetico statorico;
- Φ_R - flusso magnetico rotorico.

Fig. 2.5 (b)

Notiamo che le correnti di fase sono messe in funzione degli angoli elettrici. Definiamo con l'angolo meccanico θ_m , che individua la posizione del rotore, l'angolo formato dal vettore spaziale del flusso del magnete (ovvero il vettore posizionato sull'asse di rotore

passante per il centro del polo nord, che indica la direzione ove il flusso è massimo) con l'asse di statore. L'angolo elettrico θ_{me} è legato alla posizione meccanica θ_m dalla relazione $\theta_{me} = c_p \theta_m$, con c_p = numero di coppie polari. Intuitivamente se vi sono c coppie polari, le grandezze elettromagnetiche si ripetono c_p volte nel corso di una rotazione meccanica completa del rotore. Si dice, per fissare le idee concettualmente, che l'angolo elettrico è c_p volte "più veloce" di quello meccanico. Nel caso in questione in cui vi sono 2 poli e quindi una sola coppia polare, angoli elettrici e angoli meccanici si considerano uguali.

Il periodo elettrico è diviso in 6 intervalli, ciascuno della durata di 60°; in ciascun intervallo vengono pilotati gli interruttori in modo che solamente due fasi alla volta vengano alimentate con una corrente continua. La fig. 2.5 illustra la sequenza degli intervalli e l'andamento delle correnti in ognuno di essi.

Le correnti statoriche creano un campo magnetico individuato dai due poli fittizi N' ed S', le cui linee di forza sono rappresentate dalle ellissi (regola della vite). N' attira S (il polo sud del rotore) e respinge N, mentre S' attira N e respinge S, generando così una coppia M che fa ruotare il rotore in senso orario. Analizziamo nel dettaglio cosa avviene in ogni intervallo, riferendoci ad esempio all'intervallo B. All'inizio dell'intervallo, il campo statorico avanza di 60° elettrici grazie alla commutazione delle fasi attuata dall'inverter sulla base dell'informazione di posizione rotorica ottenuta (in questo caso cioè la condizione di fine intervallo A). Lo sfasamento tra flusso di statore e flusso di rotore passa istantaneamente da 60° a 120°; a seguito lo sfasamento inizierà poi a diminuire a causa dell'attrazione, con il vettore del flusso rotorico che tende naturalmente a sovrapporsi a quello statorico, raggiungendo il valore 90° a metà intervallo. Quando lo sfasamento si riporta nuovamente a 60°, viene raggiunta la condizione di fine intervallo B e avviene una nuova commutazione degli interruttori. Questo meccanismo si ripete per ogni intervallo, dunque il campo statorico può assumere solo 6 distinte posizioni. Notiamo come lo sfasamento di 90° tra i due flussi, corrispondente alla condizione di massima coppia, venga rispettato solo mediamente anziché istantaneamente: è pertanto presente una certa ripple di coppia, che in alcuni casi deve venire ridotto adeguatamente a valori accettabili mediante l'uso di opportuni regolatori posti a monte del modulatore PWM che pilota i transistor dell'inverter. In tal modo, la fase che rimane aperta in ogni intervallo non viene più abbandonata a se stessa, ma viene anch'essa controllata durante il transitorio di azzeramento della corrente.

Il ragionamento fatto finora è abbastanza indicativo e non rigoroso, dato che dovremmo tener presente che stiamo parlando di grandezze che comunque hanno una distribuzione spaziale nel traferro caratterizzata da una simmetria di quarto d'onda. Tuttavia

non sono sinusoidi, per cui la rappresentazione vettoriale (fondamentale ad esempio nei brushless sinusoidali) non è correttamente applicabile e viene evitata.

2.2.2 Modello equivalente DC-brushless

Per prima cosa andiamo ad analizzare il flusso concatenato negli avvolgimenti prodotto dalle correnti di fase, ossia determinare i coefficienti di autoinduttanza L e mutua induttanza M . Nell'ipotesi di isotropia della struttura e simmetria degli avvolgimenti di fase, si verifica che questi parametri siano tutti uguali per le tre fasi, e risultano costanti (indipendenti dall'angolo di rotore). In particolare i flussi mutuamente accoppiati hanno segno opposto a quelli che si auto concatenano in ciascun avvolgimento; possiamo quindi scrivere:

$$\begin{cases} L_a = L_b = L_c = L \\ M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = -|M| \end{cases} \quad (2.1)$$

Allo stesso modo si ipotizzano uguali tra loro le resistenze di fase:

$$R_a = R_b = R_c = R \quad (2.2)$$

I flussi totali concatenati da ciascuna fase sono dati dalla somma del flusso concatenato prodotto dalle correnti di fase e quello prodotto dai magneti permanenti:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \lambda_{a,mg} = L i_a - |M| (i_b + i_c) + \lambda_{a,mg} \\ \lambda_b &= L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + \lambda_{b,mg} = L i_b - |M| (i_a + i_c) + \lambda_{b,mg} \\ \lambda_c &= L_c i_c + M_{cb} i_b + M_{ca} i_a + \lambda_{c,mg} = L i_c - |M| (i_a + i_b) + \lambda_{c,mg} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nell'ipotesi di assenza di filo neutro negli avvolgimenti, la condizione di avere in ogni istante la somma delle correnti di fase nulla è senz'altro verificata ($i_a + i_b + i_c = 0$); utilizzando quest'ultima nelle (2.3), si possono riscrivere come:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_{eq} i_a + \lambda_{a,mg} \\ \lambda_b &= L_{eq} i_b + \lambda_{b,mg} \\ \lambda_c &= L_{eq} i_c + \lambda_{c,mg} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

dove si è definita l'induttanza sincrona $L_{eq} = L + |M|$; con questa scrittura si sono semplificate le equazioni, e il flusso concatenato di ogni fase dipende ora dalla sola corrente della fase stessa, avendo introdotto L_{eq} che unisce in un unico parametro i significati di auto e mutua induttanza.

A questo punto possiamo scrivere le equazioni generali di bilancio delle tensioni di fase U_a, U_b, U_c , caratterizzandole poi nel secondo passaggio con i risultati fin qui ottenuti:

$$\begin{aligned}
 u_a &= Ri_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = Ri_a + L_{eq} \frac{di_a}{dt} + e_a \\
 u_b &= Ri_b + \frac{d\lambda_b}{dt} = Ri_b + L_{eq} \frac{di_b}{dt} + e_b \\
 u_c &= Ri_c + \frac{d\lambda_c}{dt} = Ri_c + L_{eq} \frac{di_c}{dt} + e_c
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

dove definiamo con e_a, e_b, e_c le forze controelettriche dovute al movimento dei magneti permanenti rispetto agli avvolgimenti ($e = \frac{d\lambda_{mg}}{dt}$); un circuito equivalente del motore brushless DC con avvolgimenti a stella è illustrato in fig. 2.6.

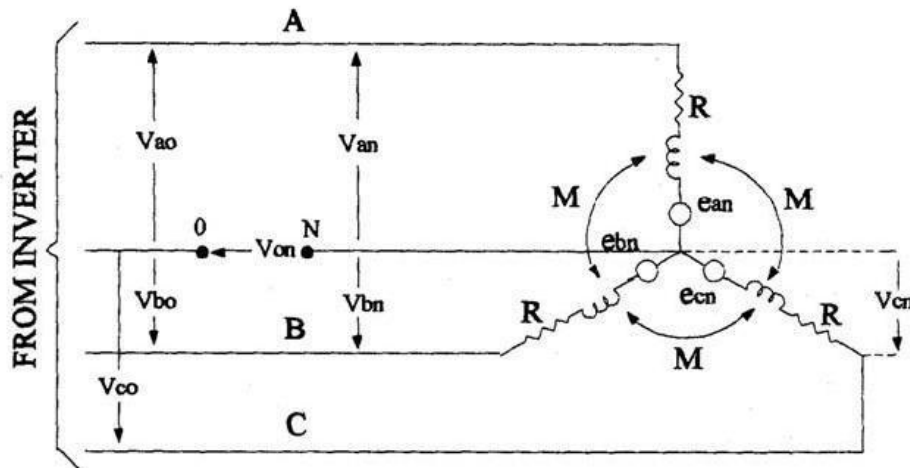


Fig. 2.6

Come già introdotto nella spiegazione del funzionamento della macchina, supponendo che la commutazione tra le fasi sia del tutto istantanea, in ogni istante circolerà corrente

solamente in due fasi; possiamo quindi derivare il circuito equivalente più specifico di fig. 2.7, dove compaiono con ovvio significato i valori concatenati di tensione di alimentazione e di f.c.e.m..

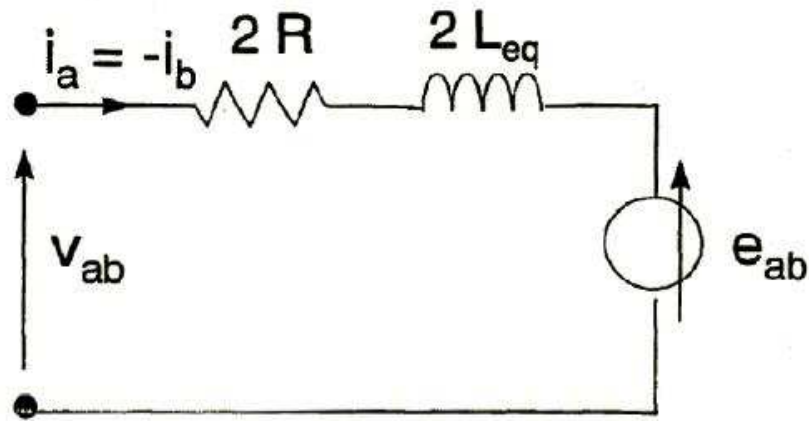


Fig. 2.7

In quest'ultima rappresentazione si nota la totale analogia con il circuito di armatura di un motore c.c.: il motore brushless trapezoidale può essere in effetti considerato come una convenzionale macchina a corrente continua in cui sul rotore vi sono posti i magneti permanenti, e la commutazione delle correnti avviene sullo statore per via elettronica anziché meccanica.

Applichiamo il bilancio delle potenze alle equazioni (2.5), ovvero moltiplichiamo ciascuna di esse per la rispettiva corrente di fase e sommiamo termine a termine; si ottiene:

$$u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = R(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \right] + e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.6)$$

dove il primo membro rappresenta la potenza totale assorbita dal motore. Analizzando ciò che compare a secondo membro, il primo termine è la potenza istantanea dissipata per effetto joule sulle resistenze; il secondo termine è la potenza impegnata per produrre le variazioni di energia magnetica connessa al campo magnetico prodotto dagli avvolgimenti, che può essere positiva o negativa; quello che rimane al terzo termine rappresenta quindi la potenza elettrica che viene trasmessa al rotore e dunque trasformata in potenza meccanica. Essa viene definita appunto potenza elettromeccanica, ed è pari al prodotto tra coppia sviluppata e velocità di rotazione:

$$p = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = m \omega_m = \frac{m \omega_{me}}{C_p} \quad (2.7)$$

dove ω_m e ω_{me} sono rispettivamente la velocità meccanica e la velocità elettrica.

2.2.3 Principali grandezze caratteristiche

In questo paragrafo andiamo ad analizzare nel dettaglio gli andamenti delle grandezze caratteristiche del motore, quali flusso magnetico al traferro, forza controelettromotrice ed infine coppia sviluppata. Per semplicità dei calcoli e tracciamento dei grafici, riferiamoci ad un motore avente 12 cavità statoriche: ogni fase sarà costituita da due matasse adiacenti, occupando due cave (stavolta sfasate tra loro di 30°) per polo per fase. Partiamo dall'andamento del flusso concatenato con la matassa aa' dell'avvolgimento di fase "a" al variare della posizione angolare. Tale flusso varia linearmente, dato che l'induzione magnetica è costante sotto ogni passo polare, e si ottiene integrando quest'ultima sulla superficie:

$$\lambda(\theta_e) = N \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta_e) r l d\theta_e = N B l r \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta_e - \int_{-\pi/2}^{\pi/2 + \theta_e} d\theta_e \right] = 2 N B l r \left(\frac{\pi}{2} - \theta_e \right) \quad (2.8)$$

per $\theta_e \in [0, \pi]$, dove N è il numero di spire della matassa, r è il raggio ed l è la lunghezza assiale del rotore. Per $\theta_e \in [-\pi, 0]$, il flusso avrà ancora andamento lineare, ma con pendenza esattamente opposta.

Per trovare la f.c.e.m. si deriva il flusso concatenato nel tempo. Risulta:

$$e = \frac{d\lambda(\theta_e)}{dt} = \frac{d\lambda(\theta_e)}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = \omega_e \frac{d\lambda(\theta_e)}{d\theta_e} = \mp 2 N B l r \omega_e \quad (2.9)$$

il segno meno vale per θ_e compreso nell'intervallo $[0, \pi]$, mentre il segno più vale per $[-\pi, 0]$. Otteniamo così un'onda quadra. Questa equazione è relativa alla f.c.e.m. indotta in una singola matassa, ma sappiamo che nel nostro modello ogni fase è costituita da due di esse insieme. Per trovare l'andamento nell'altra, si segue lo stesso procedimento arrivando allo stesso risultato, ad eccezione che questa è sfasata spazialmente rispetto alla prima. Le f.c.e.m.

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

nella seconda matassa avrà quindi la stessa forma della prima, ma sarà sfasata in ritardo di 30° . La f.c.e.m. totale indotta nell'avvolgimento sarà dunque la somma delle f.c.e.m. indotte nelle singole matasse. L'effetto prodotto dalla somma di più onde quadre, è quello di creare una forma d'onda a gradini, nel nostro caso a 3 livelli. L'andamento reale nella pratica si discosta da quello ideale, le variazioni non possono essere tanto ripide e perfettamente a gradino e gli angoli sono smussati: è in questo modo che assume la caratteristica forma trapezoidale. Il valore massimo, che la forma d'onda mantiene teoricamente per circa 150° ma che in pratica le irregolarità e non idealità del campo magnetico la limitano a 120° , è dato dalla somma dei due contributi di forza controelettrica, che quindi possiamo esprimere come:

$$e_{\max} = (2 N_f B r l) \omega_r = \lambda_f \omega_e \quad (2.10)$$

dove N_f rappresenta il numero totale di spire in serie per fase (nel caso in esame risulta uguale a $2N$).

In figura 2.8 viene riprodotto l'andamento del flusso concatenato con la fase a (b) in relazione all'induzione magnetica al traferro (a).

In fig. 2.9 riportiamo invece l'onda di f.c.e.m. indotta nelle due matasse (fig.a e fig.b) e la totale indotta nell'avvolgimento (fig.c).

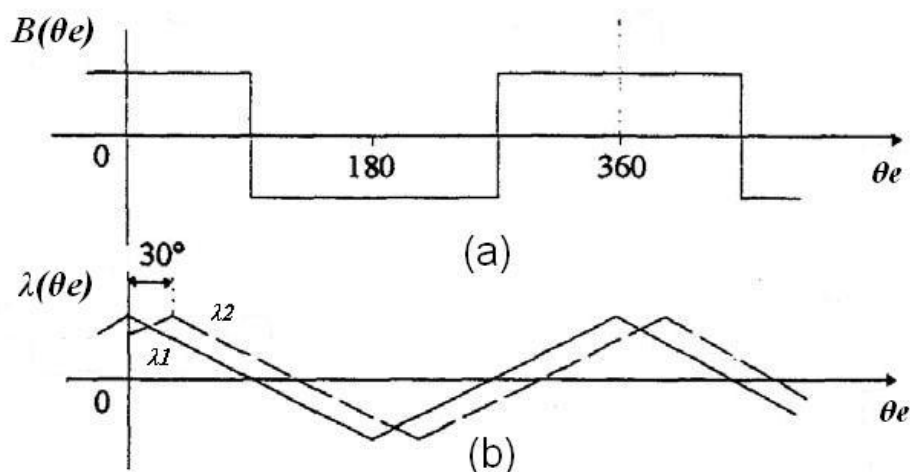


Fig. 2.8

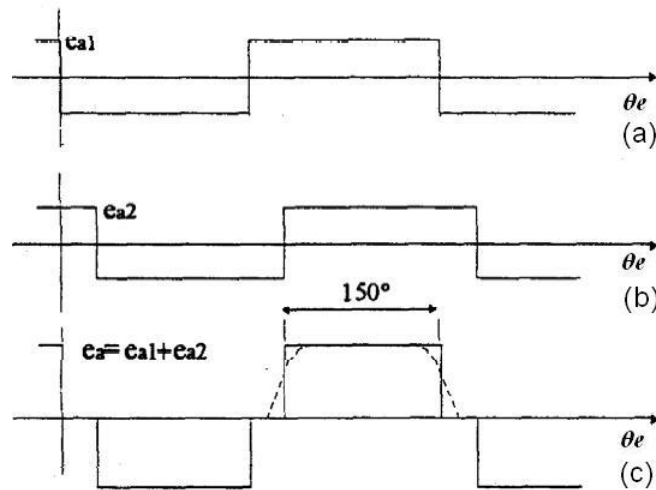


Fig. 2.9

Ritorniamo all'equazione (2.7), dove supponiamo di alimentare le fasi di statore con una terna di correnti ad onda quadra di ampiezza costante I_{dc} ; l'obiettivo è quello di mantenere la potenza elettrica che verrà poi trasmessa al rotore costante, in modo tale per cui anche la coppia sviluppata sia costante per una fissata velocità angolare. Compito del sistema di controllo è fare in modo che le correnti di alimentazione possano soddisfare questa condizione. Come si nota in figura 2.10, le correnti devono essere sincronizzate con gli intervalli in cui le corrispondenti f.c.e.m. assumono il valore massimo e dello stesso segno, quindi assumono valore positivo o negativo in periodi limitati a 120° e nulle nei periodi in cui la f.c.e.m. sale o scende.

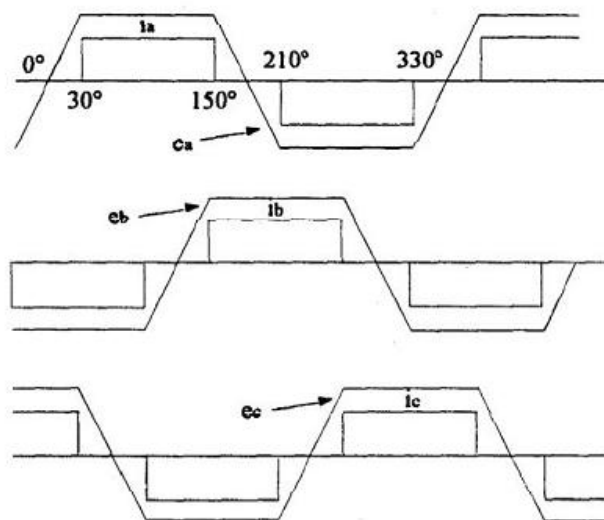


Fig. 2.10

In questo modo ovviamente quando la corrente è nulla la f.c.e.m. non dà alcun contributo alla coppia, che rimane sempre costante. Si intuisce che affinché il sistema funzioni correttamente, è fondamentale una precisa sincronizzazione in modo che corrente ed f.c.e.m. non si sfasino mai. La sincronizzazione tra correnti e f.c.e.m. è imposta da sensori di posizione rotorica che rilevano la posizione istantanea del flusso generato dai magneti, dai cui ci si può a sua volta ricavare il valore delle f.c.e.m., e in base a ciò stabiliscono la corretta distribuzione delle correnti di fase.

La potenza elettromeccanica è dunque costante e pari a:

$$P = 2e_{\max} I_{dc} = 2\lambda_f I_{dc} \omega_e \quad (2.11)$$

Quindi la coppia risulta costante nel tempo e indipendente dalla posizione angolare di rotore, e vale:

$$\begin{aligned} M &= \frac{P}{\omega_m} = c_p \frac{P}{\omega_e} = 2c_p \lambda_f I_{dc} = 2c_p (2N_f B l r) I_{dc} = \\ &= \frac{4}{\pi} c_p^2 N_f \left(B \frac{\pi r}{c_p} l \right) I_{dc} = K_t \Phi I_{dc} \end{aligned} \quad (2.12)$$

dove Φ è il flusso prodotto da ciascun polo; K_t è un coefficiente che tiene conto di parametri costanti legati alle caratteristiche costruttive del motore, che denominiamo costante di coppia.

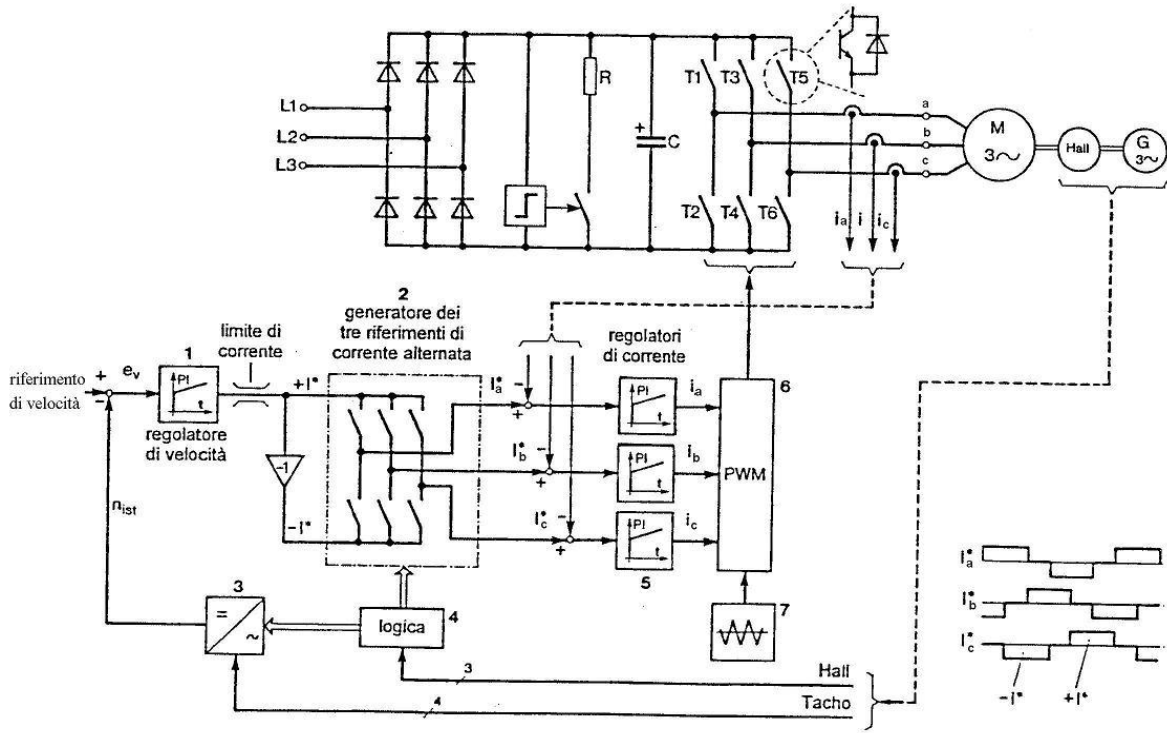
2.2.4 Controllo dei motori trapezoidali

Il sistema di controllo è un aspetto fondamentale del motore brushless, che pesa su gran parte della qualità e del costo finale e inoltre ne giustifica la nomenclatura adottata. Nella macchina DC-brushless, affinché si conservi una forma trapezoidale del campo, è necessario che i campi prodotti dalle singole correnti di fase vengano generati quando l'asse del rotore si trova in settori angolari della superficie di statore ben precisi. Dal punto di vista del controllo, queste macchine si comportano allo stesso modo delle macchine in corrente continua: è naturale quindi che si utilizzino convertitori e tecniche di controllo e alimentazione derivate proprio dai motori in corrente continua. Nelle macchine AC invece il campo al traferro è di tipo sinusoidale e, combinando opportunamente i campi prodotti dalle correnti di fase, può

assumere qualsiasi posizione possibile. Servono pertanto tecniche di controllo di tipo vettoriale generalmente complesse, che per essere implementate necessitano la conoscenza precisa della posizione del rotore in ogni istante. Differentemente nei DC brushless è sufficiente sapere solamente quando il rotore supera determinate posizioni: da qui si intuisce dove risiede la causa della maggiore semplicità. Se da un lato una maggiore semplicità del sistema di stima della posizione rotorica viene ritenuta uno svantaggio, può diventare uno svantaggio quando si vuole indebolire il campo prodotto dai magneti permanenti (deflussare). In tal caso è necessario poter indurre un campo smagnetizzante con una direzione ben precisa, caratteristica posseduta solo negli AC-brushless grazie alle tecniche di controllo di corrente vettoriale.

Come già anticipato, per generare una coppia costante è necessario alimentare il motore con una terna simmetrica di correnti di forma d'onda quasi quadra. Per ottenerle, si utilizzano in genere invertitori di tipo PWM a controllo adattativo di corrente mediante comparatori a confronto di rampa o alternativamente comparatori ad isteresi. Come per i motori a corrente continua, è possibile realizzare un sistema di controllo retroazionato a doppio anello: un anello di corrente per ciascuna delle tre fasi, e un anello più esterno di velocità. Dalla (2.12), si deduce che un controllo di corrente equivale ad effettuare un controllo di coppia. Il controllo di corrente è composto da due livelli: il primo stabilisce quali delle due fasi deve essere in conduzione contemporanea e la loro sequenza di commutazione, basandosi sull'informazione ricevuta dai sensori di posizione; il secondo, mediante regolatori, impone l'ampiezza della corrente reale uguale a quella del riferimento.

La figura 2.11 presenta un possibile schema a blocchi completo per la regolazione trapezoidale.



- Schema a blocchi della regolazione trapezoidale.

Fig. 2.11

Lo scopo finale è quello di pilotare gli interruttori statici di potenza dell'invertitore $T_1...T_6$ in modo che la velocità del rotore sia il valore voluto proveniente da un riferimento esterno, e inoltre che la corrente assorbita dal motore non superi il valore impostato come limite. Partiamo dall'anello esterno di velocità; il segnale di reazione di velocità n_{ist} proveniente dal convertitore dei segnali della tachimetria trifase brushless viene confrontato con il riferimento analogico esterno di velocità n^* e inviato al primo regolatore PI di corrente. L'uscita del regolatore, che da un segnale di corrente, entra nel generatore dei tre riferimenti di corrente alternata $I_a/I_b/I_c$; esso è costituito da sei interruttori statici pilotati dal blocco denominato logica, il quale a sua volta agisce in base ai segnali inviati dai trasduttori di posizione ad effetto Hall montati nel motore. Passiamo ora a quello che abbiamo definito il secondo livello del controllo di corrente. I tre riferimenti di corrente prodotti si confrontano con le reali correnti misurate del motore nei regolatori PI; ognuna delle tre uscite dei regolatori viene confrontata a sua volta con il segnale triangolare ad alta frequenza (in genere almeno 10 volte superiore alla frequenza massima della corrente nel motore). In base a quest'ultimo risultato viene poi generato il comando degli interruttori dell'inverter secondo la tecnica della modulazione della larghezza degli impulsi (PWM sta per Pulse Width Modulation). In breve, quello prodotto dal confronto tra corrente reale e di riferimento rappresenta un segnale di errore che funge da modulante, mentre l'onda triangolare generata da

un oscillatore funge da portante. Se il segnale modulante è maggiore della portante, l'uscita del comparatore sarà un "1" logico che chiude l'interruttore superiore della gamba dell'inverter, in modo tale che la tensione di fase applicata sia positiva. Viceversa, quando il segnale modulante diventa minore della portante, viene attivato l'interruttore inferiore della gamba dell'inverter e la tensione di fase si porterà quindi ad un valore negativo.

In alcuni casi, il solo controllo di coppia può essere sufficiente a soddisfare le specifiche richieste, per cui il controllo di velocità viene bypassato.

2.3 Prove effettuate in laboratorio

In questo paragrafo verrà effettuata una breve analisi delle prove effettuate nel laboratorio di azionamenti elettrici EDLab dell'università di Padova. Tutte le prove sono state effettuate nello stesso motore ruota DC-brushless appartenente al modello di e-bike esaminato. La figura 2.12 illustra un'immagine del motore testato.



Fig. 2.12 (a): particolare di statore e avvolgimento



Fig. 2.12 (b): particolare del rotore esterno

Esso è un motore al mozzo, avente potenza nominale 250W, avvolgimento trifase distribuito in 18 cave, rotore esterno dotato di 20 magneti. Lo scopo delle prove è dare una caratterizzazione a certe caratteristiche peculiari, alcune delle quali già discusse nella trattazione. Nella prima si tratta di effettuare la misura della cosiddetta coppia di cogging o coppia di impuntamento, presente in ogni macchina a magneti permanenti; la seconda prova consiste nel rilievo delle forme d'onda delle forze controelettromotrici.

La figura 2.13 mostra il motore posizionato nel banco prova dove sono state fatte le misure. Il sistema viene definito nel particolare "banco lento", essendo stato progettato per effettuare prove a velocità di rotazione particolarmente bassa. Sostanzialmente un banco prova è formato da due sostegni: da una parte viene fissato il motore sottoposto al test, dall'altra vi è invece un altro motore che fa parte del banco. Quest'ultimo viene appositamente pilotato da un inverter pilotato attraverso un computer, quindi la gestione dell'azionamento avviene via software. Di grande importanza è il fatto che assicuri una buona accuratezza del movimento rotorico e non sia affetto di alcun tipo di disturbo di coppia. I due motori vengono connessi insieme attraverso due giunti ad un torsionmetro, un dispositivo molto costoso e delicato che ha il compito di rilevare la coppia sviluppata. I dati rilevati vengono poi inviati ad un dispositivo che effettua una elaborazione dei segnali per renderli in forma digitale, e poter essere così visualizzati in una finestra di terminale.

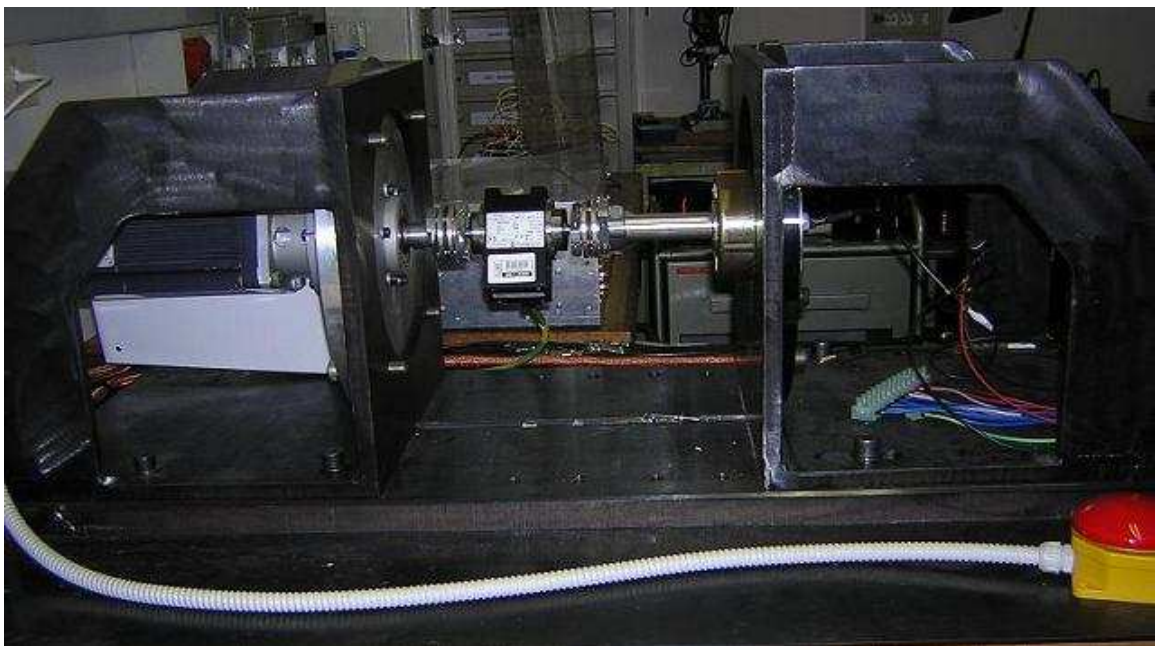


Fig. 2.13

La particolare struttura del motore, con il rotore a forma di corona circolare esterna e il rotore interno, si sono rivelati un piccolo inconveniente proprio per questa diversità rispetto ai più convenzionali brushless (rotore interno), dato che così com'è il motore non è direttamente installabile sul banco. Si è fatto quindi ricorso ad un'apposita struttura, lavorata al tornio.

È stata riprodotta una flangia, compatibile con il sostegno del banco prova, che blocca lo statore tramite una chiavetta (la cui funzione originale era di bloccare lo statore al mozzo della ruota); il rotore è invece libero. Successivamente, per poter acquisire il moto di rotazione del motore e quindi la coppia, è stata creata un'altra struttura ausiliare: si tratta di un canotto di forma cilindrica, cavo all'interno per contenere l'asse del motore e sufficientemente largo per evitare il contatto, la cui estremità è compatibile con il giunto del torsionmetro con il quale si andrà a lavorare e la base è fissabile tramite viti alla superficie superiore del rotore.

2.3.1 Misura cogging torque

La coppia di cogging (o di impuntamento o coppia a zero corrente) è un fenomeno che si manifesta come una leggera oscillazione della coppia erogata dal motore, per cui la essa non è sempre perfettamente costante. La cogging torque è causata dall'interazione tra i magneti permanenti montati sul rotore e le anisotropie di statore, dovute al fatto che non è un corpo uniforme per la presenza delle cave. Il fenomeno è comunque relativo questa al caso di macchine SPM, con magneti montati superficialmente; macchine di tipo IMP presentano anisotropie maggiori e perciò non vengono considerate. Più in dettaglio, la cogging torque è causata dalla variazione di energia magnetica associata allo spostamento angolare dei magneti, ovvero le espansioni rotoriche scambiano un po' di energia con gli avvolgimenti in certe posizioni. Si può dunque manifestare anche in assenza di alimentazione.

Si intuisce che questo aspetto può diventare essere un fastidioso inconveniente nel caso si lavori a basse velocità e sia richiesta una particolare precisione del moto.

Qui sotto viene riportato il grafico relativo all'andamento di coppia rilevato nelle prova.

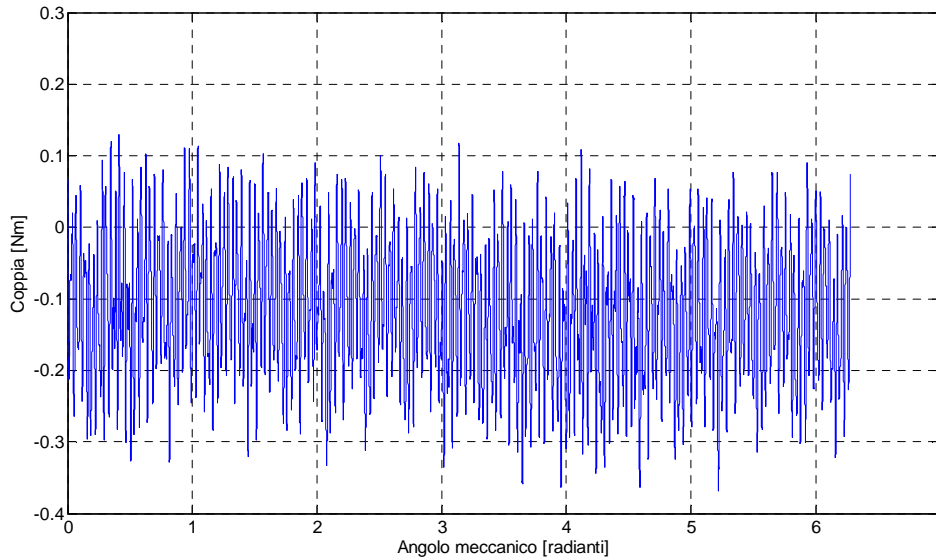


Fig. 2.14

L'ascissa si ferma a 6.28 radianti, ovvero il motore compie una rotazione completa. Come si nota la coppia non rimane costante ma oscilla attorno ad un valore, in questo caso all'incirca -0.1 N/m. L'entità dell'oscillazione non è elevata, infatti la misura picco-picco dell'onda risulta circa 0.4 N/m. Notiamo infine come i picchi raggiungano i valori più elevati con regolarità, a formare un involuppo praticamente sinusoidale.

2.3.2 Misura della back-emf

Per effettuare queste prove, il nostro motore è stato scollegato dal motore guida e dal torsionometro tenendolo fisso alla sola flangia, e messo in rotazione ad una certa velocità angolare. La rotazione viene effettuata manualmente, avvalendosi ad esempio dell'uso di un trapano collegato al canotto tramite giunto meccanico, e cercando di mantenerlo ad una velocità il più possibile costante. I tre terminali degli avvolgimenti di fase vengono collegati a delle sonde differenziali 1/20, e successivamente posti in ingresso ad un oscilloscopio digitale. Ovviamente durante la rotazione vengono indotte negli avvolgimenti le f.c.e.m., e grazie all'oscilloscopio riusciamo a rilevarle e a darne un'istantanea della forma d'onda relativa ad una certa velocità.

L'immagine 2.15 qui sotto, che ripropone esattamente ciò che compare sullo schermo dell'oscilloscopio durante le misure, è relativa alle f.c.e.m. stellate (ovvero misurate tra fase e

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

centro stella) per una velocità di rotore di circa 10000 rpm (giri/min). Si notano tre forme d'onda di colore diverso, ognuna delle quali è relativa ad una fase.

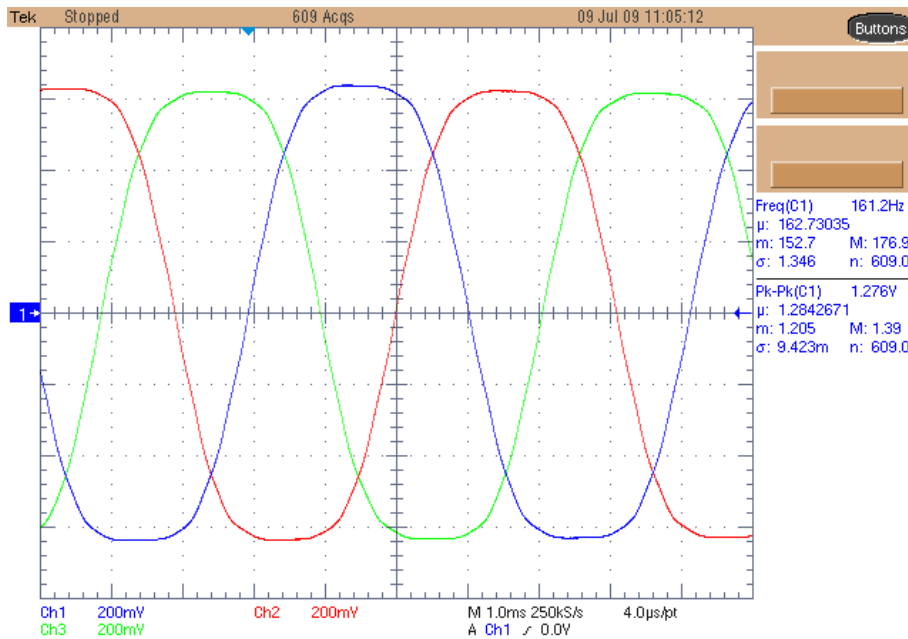


Fig.2 15

Tra i dati più rilevanti che segnaliamo, troviamo la frequenza delle forme d'onda, che abbiamo rilevato essere pari a 161,2 Hz. Dalla formula $\Omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60}$, dove n è la velocità in rpm e Ω la velocità angolare, e da $\Omega = 2\pi f$, dalla frequenza delle forme d'onda possiamo ricavare la velocità del rotore in rpm, che risulta circa 10000 rpm come prefissato.

Dalla finestra dell'oscilloscopio si può inoltre leggere l'ampiezza delle forme d'onda: la tensione picco-picco rilevata è 1,276 V (tenendo conto in questo dato del fattore di attenuazione 1/20 delle sonde differenziali). Infine si tengono conto le impostazioni dello strumento di misura con le quali si ha lavorato, quali ad esempio la risoluzione, l'intervallo di campionamento e la base dei tempi, riportate in basso a destra della figura.

In figura 2.16 viene riportato gli andamenti delle f.c.e.m. concatenate (ovvero misurate tra fase e fase). Essendo una combinazione delle f.c.e.m. stellate, il loro andamento non è più riconoscibile come trapezoidale.

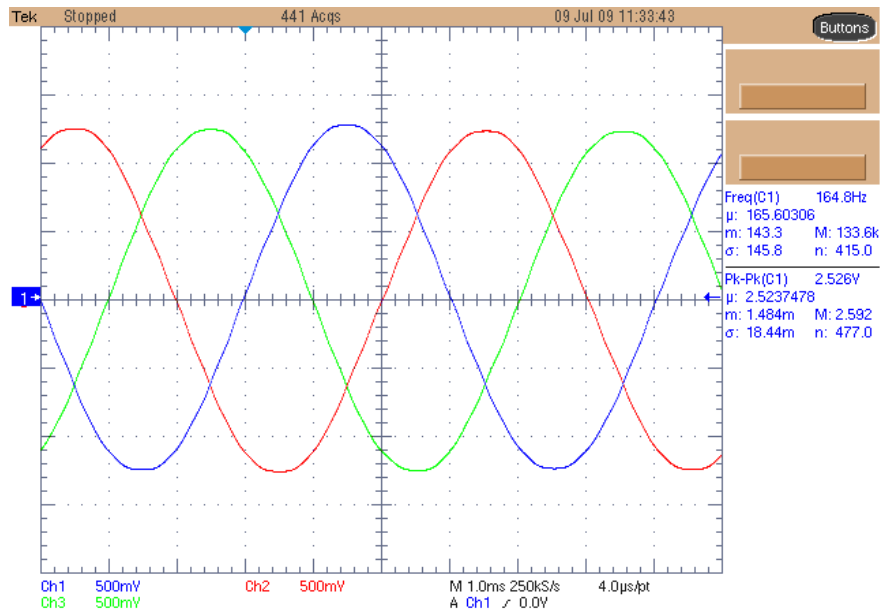


Fig. 2.16

3 Analisi della compatibilità elettromagnetica

3.1 Introduzione alla compatibilità elettromagnetica

3.1.1 Elettromagnetismo e origine dei fenomeni di interferenza elettromagnetica

Con la parola elettromagnetismo si intende l'insieme dei fenomeni dovuti all'interazione di campi elettrici e campi magnetici. Un'onda elettromagnetica è quindi una variazione periodica nel tempo dei valori di campo elettrico e magnetico nello spazio, causata da un qualche fenomeno come ad esempio il movimento oscillatorio di una carica elettrica. Campo elettrico e da un campo magnetico sono collegati fra loro da relazioni matematiche non sempre semplici, e sono proprio i valori di questi campi a caratterizzare l'onda: infatti, si definisce intensità o ampiezza di un'onda elettromagnetica (grandezza da non confondere con la sua energia) il valore che assumono istante per istante il campo elettrico (misurato in Volt/metro) ed il campo magnetico (misurato in Ampere/m). Un'altra quantità che caratterizza l'onda elettromagnetica è la densità di potenza (misurata in Watt/m²), cioè la potenza trasportata dall'onda per unità di superficie, definibile ad una certa distanza dalla sorgente. Un'onda elettromagnetica è comunque una forma di segnale periodico, cioè ripete i suoi valori di ampiezza nel tempo e nello spazio, ed è quindi caratterizzata anche da altre grandezze fisiche, quali il periodo, misurato in secondi, la frequenza, espressa in cicli al secondo e

misurata in Hz, la lunghezza d'onda, misurata in metri e nei suoi multipli e sottomultipli, e l'energia, misurata in elettronvolt (eV) e nei suoi multipli e sottomultipli. Queste grandezze sono strettamente intercorrelate fra loro da semplici relazioni matematiche, che permettono di ricavare il valore di ognuna, una volta nota una sola di esse.

Numerosi fenomeni con cui abbiamo a che fare quotidianamente e gran parte delle nostre attività abituali sono fonti di onde elettromagnetiche.

Ad esempio, un fenomeno naturale come il fulmine produce un'onda elettromagnetica molto potente; sul fatto di come il fulmine possa generare queste onde radio basta rifarsi ad alcuni semplici concetti di fisica. Ricordiamo brevemente che una carica elettrica è circondata da un campo elettrico, ma se la carica è in moto, essa produce una corrente ed un campo magnetico la cui intensità dipende dalla velocità della carica e abbiamo detto che un'onda elettromagnetica non è altro che l'insieme di un campo elettrico e magnetico in fase tra loro.

Altri fonte di onde elettromagnetiche è rappresentato dall'ambiente elettromagnetico non naturale (cioè quello prodotto dall'uomo) è rappresentato sia dai campi elettromagnetici, generati intenzionalmente, in quanto la trasmissione dei campi rappresenta lo scopo specifico dell'apparato (come le linee di trasmissione dell'energia, i sistemi di radio-teletrasmissione quali le antenne dei radioamatori, i sistemi radiotelevisivi, le stazioni radio della telefonia mobile, radar, etc.), sia da quelli risultanti come fattore di perdita dall'uso dell'apparato (ad esempio i campi dispersi intorno alle normali apparecchiature elettriche, ai riscaldatori, ai forni a microonde, etc.).

Tutti questi fenomeni, interagendo tra loro, possono causare disturbi ed anomalie alle apparecchiature elettroniche, e tenteremo ora di capire in che modo ciò può avvenire.

È noto già dagli inizi della storia delle radiocomunicazioni telegrafiche che gli spinterometri generano onde elettromagnetiche le cui componenti in frequenza hanno un ampio spettro e che queste onde possono causare interferenza (o rumore) in vari dispositivi elettrici od elettronici quali radio o ricevitori telefonici. Al giorno d'oggi invece una sorgente di emissioni elettromagnetiche che è diventata ormai importantissima sono i dispositivi digitali in generale, in particolare i computer.

Questi dispositivi digitali utilizzano forme d'onda impulsive di tensione per rappresentare i numeri binari: il livello alto è associato ad esempio all'1 logico, mentre il livello basso è associato allo zero logico. In tal modo numeri e altri simboli vengono rappresentati mediante sequenze di forme d'onda elementari. Il tempo di transizione tra due possibili livelli di un segnale digitale è il più importante fattore di determinazione del suo

contenuto spettrale: tanto più breve è questo tempo, tanto più ampio sarà lo spettro di frequenze.

Il loro contenuto spettrale occupa generalmente un ampio intervallo di frequenze e può causare fenomeni di interferenza in altri dispositivi elettronici.

Tutti noi siamo a conoscenza dei fenomeni di interferenza e rumore provocato dai fulmini sui ricevitori radio AM. La causa di questo fenomeno è dovuta al fatto che alcune delle componenti appartenenti all'ampio spettro del fulmine possono passare attraverso il filtro d'ingresso del ricevitore e sovrapporsi al segnale utile, causando rumore.

Questo è un esempio di interferenza prodotta su ricevitori intenzionali, ossia un apparato opportunamente predisposto per la ricezione dei segnali. Di uguale importanza sono i fenomeni di interferenza prodotti su ricevitori non intenzionali, ossia apparati non progettati per la ricezione. Ad esempio, una forte emissione di una stazione radio o di una emittente televisiva può essere intercettata da un computer che lavora nelle sue vicinanze ed essere interpretata accidentalmente come un dato o un segnale di controllo, causando possibili anomalie nel funzionamento. Allo stesso modo un computer può creare emissioni che interferiscono con il normale funzionamento di un apparecchio radiofonico.

3.1.2 La compatibilità elettromagnetica

Da quanto esposto finora nel precedente paragrafo, si intuisce che tutti i dispositivi elettrici ed elettronici devono essere progettati secondo determinati criteri atti a minimizzare i fenomeni di interferenza in tali dispositivi e dai dispositivi stessi.

Un sistema elettronico in grado di funzionare compatibilmente con altri sistemi e di non produrre o essere suscettibile di fenomeni di interferenza elettromagnetica viene definito *elettromagneticamente compatibile* con l'ambiente in cui opera.

Con *compatibilità elettromagnetica* (EMC, dall'inglese Electromagnetic compatibility) viene intesa la disciplina, nell'ambito dell'ingegneria elettrica ed elettronica, che studia la generazione, la trasmissione e la ricezione non intenzionali di energia elettromagnetica in relazione agli effetti indesiderati che queste possono comportare, con l'obiettivo di garantire il corretto funzionamento nel medesimo ambiente dei diversi apparati che coinvolgono fenomeni elettromagnetici nel loro funzionamento.

Nel perseguire il suo intento, la compatibilità elettromagnetica prende in considerazione diverse problematiche., che si possono fondamentalmente suddividere in: *problematiche di emissione* , che si riferiscono alla riduzione della generazione non

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

intenzionale di energia elettromagnetica ed alle contromisure atte ad evitare la sua trasmissione; *problematiche di suscettibilità* (o *immunità*), le quali si riferiscono invece al corretto funzionamento degli apparati elettrici ed elettronici in presenza di disturbi elettromagnetici provenienti dall'esterno.

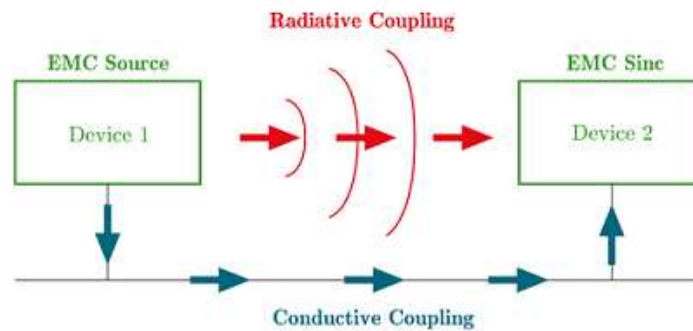


Fig. 3.1

Affinché un sistema possa definirsi elettromagneticamente compatibile, è necessario soddisfi ai seguenti criteri fondamentali:

1. non sia causa di interferenza verso altri sistemi
2. non sia suscettibile alle emissioni elettromagnetiche di altri sistemi
3. non sia causa di interferenza verso se stesso

Una buona prassi è quella di tenere conto di questi criteri già in fase di progetto, per evitare di dover poi ricorrere a costose modifiche per soddisfare i requisiti legali una volta che il prodotto è già stato immesso nel mercato. Negli ultimi due decenni le problematiche relative al rispetto delle norme europee stanno cambiando il modo di progettare e pianificare i prodotti elettronici, imponendo nuove esigenze per chi opera nel settore. Infatti in precedenza questi aspetti venivano affrontati poco prima che iniziasse la fase produttiva, mentre ora si manifesta sempre più la necessità di affiancare questa fase con il classico lavoro di progettazione. D'altra parte, non bisogna dimenticare che l'attuale mercato richiede sempre con più forza prodotti di qualità, ed è quindi fondamentale ed efficace il rispetto delle norme di compatibilità e di immunità.

A partire dagli anni '80 sono state studiate delle norme volte alla standardizzazione dei metodi di misura della Compatibilità Elettromagnetica, ed all'imposizione di vincoli di

emissione e sull'immunità ai disturbi delle apparecchiature elettroniche, al fine di favorire il libero scambio in Europa di dispositivi che rispondano a requisiti essenziali per il loro funzionamento.

Gli Enti Normativi, ovvero gli organi deputati alla stesura delle norme EMC, sono IEC, CENELEC, ETSI, CISPR e CEI; dalla loro collaborazione è nata dapprima la direttiva di compatibilità Elettromagnetica nota con la sigla 89/336, e le successive modifiche 92/3 e 93/68, e successivamente la direttiva 2004/108. Trattandosi di direttive comunitarie, non costituiscono un obbligo per i cittadini di ogni singolo stato finché non vengono recepite ed inserite nella legislazione. Lo scopo della direttive comunitarie è infatti l'armonizzazione delle leggi di ogni singolo stato appartenente, il quale ha l'obbligo di recepire il contenuto delle direttive, eventualmente correggendo indicazioni legislative contrastanti.

Per le applicazioni elettroniche vi sono inoltre altre direttive di interesse, come ad esempio la Direttiva Macchine (89/392, 91/368, 93/44, 93/68), e la Direttiva bassa tensione (73/23, 93/68). In tutte queste normative citate viene applicato il principio di conformità, ovvero le norme tecniche imposte non vincolano il progettista nel dettaglio per il raggiungimento dei requisiti essenziali: viene indicato solo l'obiettivo da raggiungere ma non il metodo con cui esso viene raggiunto. Il fine delle direttive studiate con questo approccio è in pratica di non limitare lo sviluppo tecnologico.

L'ultimo atto nell'applicazione delle normative di compatibilità è l'apposizione del marchio CE al prodotto destinato al mercato europeo. Il costruttore (o l'importatore) deve a questo scopo redigere la dichiarazione di conformità indicando, in una delle lingue ufficiali della comunità, i propri dati, la descrizione del prodotto e l'elenco delle direttive e norme tecniche applicate. Tale dichiarazione ha l'obbligo di essere conservata dal costruttore o dall'importatore per almeno 10 anni dalla produzione dell'ultimo esemplare.

3.1.3 Aspetti della compatibilità elettromagnetica

La compatibilità elettromagnetica è sostanzialmente connessa alla *produzione, trasmissione e ricezione di energia elettromagnetica*. Questi tre aspetti costituiscono la struttura base di ciascun progetto rivolto alla compatibilità elettromagnetica. In fig. 3.2 viene schematizzata la situazione.

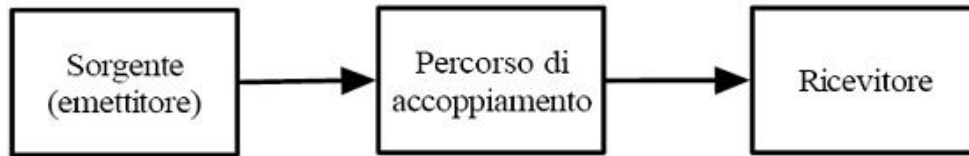


Fig. 3.2

È presente una sorgente (emettitore), la quale emette un segnale; questo, attraverso un dispositivo di trasferimento o più in generale attraverso un percorso di accoppiamento, viene trasmesso ad un ricevitore, il quale lo elabora. Il segnale ricevuto si definisce rigorosamente *segnale utile* nel caso determini nel ricevitore il comportamento desiderato; si definisce invece *disturbo* nel caso il ricevitore manifesti un malfunzionamento, dovuto appunto al segnale. In quest'ultimo caso si dice viene generata una *interferenza*.

In generale si dice che si è verificato un fenomeno di interferenza quando l'energia ricevuta ha causato un comportamento indesiderato del ricevitore. Molto spesso la causa sono accoppiamenti non voluti. Tuttavia, non sempre il trasferimento non intenzionale di energia provoca interferenza: questa si verifica solo nel caso in cui l'energia abbia un valore sufficientemente elevato perché ciò avvenga e/o se il segnale interferente ha un contenuto spettrale esteso tale che il sistema non sia in grado di filtrarlo.

L'interferenza quindi si ha solo in caso di malfunzionamento, e la trasmissione o ricezione non intenzionale di energia non sono necessariamente dannose: in pratica è il comportamento indesiderato del ricevitore a stabilirla.

Vi sono in linea di principio tre metodi di prevenzione alle interferenze. La prima è più ovvia è quella di ridurre, in modo più o meno drastico, l'emissione della sorgente. Il modo più semplice risulta quello di ridurre l'intensità dei soli segnali che danno origine ad interferenze, ma non sempre questo è possibile. Nei dispositivi digitali una soluzione potrebbe essere quella di aumentare i tempi di transizione dei segnali, riducendo quindi lo spettro e di conseguenza la loro energia.

Un secondo metodo consiste nel rendere l'accoppiamento meno efficiente possibile, ad esempio sistemando il ricevitore in un contenitore metallico con la funzione schermante. In alternativa si può agire sulla frequenza abbassandola, dato che è direttamente proporzionale all'accoppiamento elettromagnetico.

Infine si può tentare di rendere il ricevitore meno suscettibile, cosa peraltro mai semplice. Nei dispositivi digitali vengono implementati a tale scopo codici a rivelazione e correzione d'errore.

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

La trasmissione dell'energia elettromagnetica si distingue principalmente in quattro diversi fenomeni: *emissioni radiate*, *suscettività radiata*, *emissioni condotte*, *suscettività condotta*. In ogni sistema elettronico sono sempre presenti in varie forme dei cavi, che possono servire ad esempio a fornire al sistema la tensione di rete (cavo di alimentazione) oppure per connettere tra loro diverse parti del sistema.

Un disturbo che si è generato nel sistema può irradiarsi nell'ambiente circostante, ma può anche propagarsi lungo in cavi: in entrambi i casi andrà ad interferire con altri sistemi, ma può quindi seguire strade diverse.

La fig. 3.3 mostra uno schema di disturbi radiati. Nella (a) notiamo che le emissioni possono essere generate dal cavo di alimentazione, da alcune parti di un sottosistema o dai cavi che li collegano.

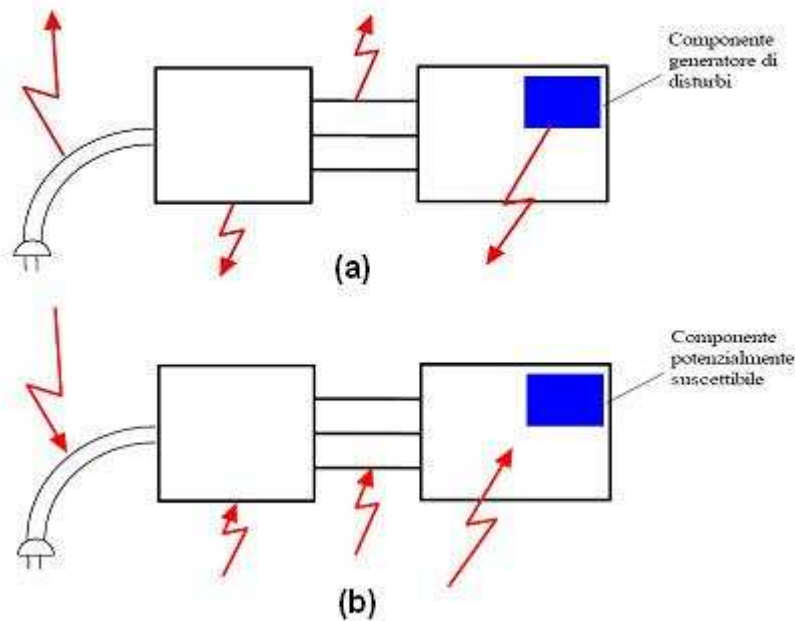


Fig. 3.3

Viceversa tutti questi componenti possono in certe condizioni comportarsi da antenne, captando le emissioni radiate da altri sistemi elettronici vicini. Le emissioni captate possono indurre nel componente stesso delle correnti e dare origine ad interferenze: è il caso della suscettività radiata (fig. 3.3 (b)).

Come già detto però emissioni e suscettività non avvengono solo in presenza di onde che si propagano nell'aria, ma si propagano anche direttamente nei conduttori (emissioni e suscettività condotta, fig. 3.4), e nella maggior parte dei casi, questo tipo di accoppiamento è anche più efficiente.

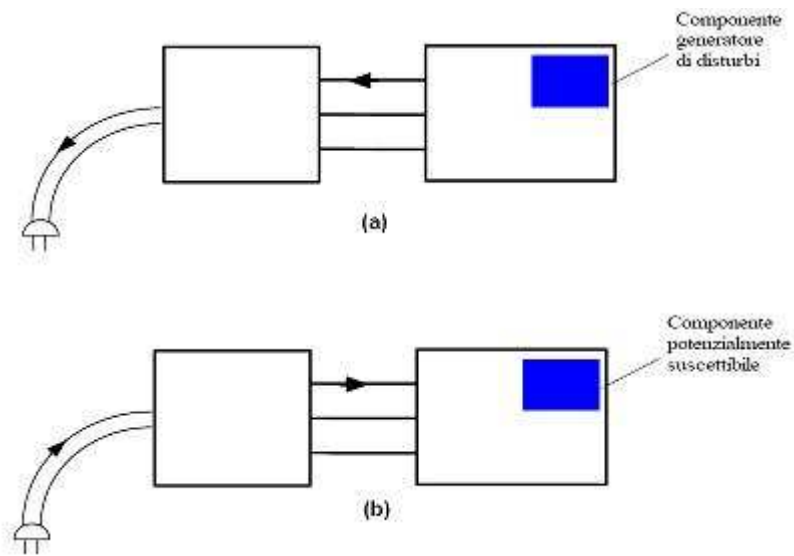


Fig. 3.4

3.1.4 Cenni storici sulla marcatura CE

A partire dal 1985, un prodotto, per poter essere immesso sul mercato europeo, deve essere fornito della marcatura CE, ovvero di un marchio che ne attesti la conformità alle normative europee su sicurezza, compatibilità e immunità. Dobbiamo però tenere presente che non si tratta di un marchio di qualità, per cui non dobbiamo confonderlo con marchi come IMQ. Sappiamo che uno degli obiettivi che i fondatori della Comunità Europea si sono posti fin dagli anni '50, è stato quello di permettere la libera circolazione delle merci nel continente.

Infatti prima del 1957, ogni nazione poteva imporre dei vincoli ai prodotti che venivano importati e spesso si trattavano di restrizioni legate a caratteristiche tecniche dei medesimi. Inoltre era permesso stabilire regolamenti diversi per un bene prodotto all'interno dello stesso stato o per un bene di importazione. Ovviamente tutto ciò diede la possibilità di attuare da più parti meccanismi di protezionismo commerciale.

Un primo tentativo di porre rimedio a questa situazione si ebbe nel 1957, con il trattato di Roma, occasione in cui l'Unione Europea decise di proibire agli stati membri di porre restrizioni all'ingresso di merci nel loro territorio. Questo evento iniziò la fase del cosiddetto "Vecchio approccio", che durerà fino al 1985. Tuttavia tale accordo non fu per nulla risolutivo: la Comunità Europea comunque procedeva all'emanazione di direttive che prevedevano l'armonizzazione delle specifiche di fabbricazione di prodotti potenzialmente pericolosi per gli utilizzatori o per l'ambiente, piuttosto che degli obblighi di prestazione. Ciò

comportava direttive di elevato contenuto tecnico, destinate a coprire nel dettaglio le particolarità di ciascun tipo di prodotto.

Questa prassi finì con lo snaturare il ruolo delle direttive: tali atti, secondo il Trattato, dovrebbero limitarsi a fissare un obiettivo, demandando agli Stati membri la scelta dei mezzi e della forma necessaria a conseguirlo. Inoltre, la necessità di giungere ad un accordo su disposizioni tecniche dettagliate rallentava sensibilmente i lavori, cosicché, una volta adottata la direttiva, i contenuti tecnici erano spesso oramai superati. Inoltre fu consentito agli stati membri porre vincoli di sicurezza sui beni importati: era possibile bloccare l'ingresso di un prodotto ritenuto non sicuro. Con il Nuovo Approccio, a partire dal 1985, viene attuata la rivoluzione copernicana della libera circolazione delle merci nel mercato unico.

Nasce la marcatura CE, ed una nuova ripartizione di compiti e responsabilità regola i rapporti tra legislazione e normazione: le istituzioni comunitarie si limitano ad armonizzare, per mezzo di direttive, i requisiti essenziali relativi a sicurezza e salute dei cittadini, protezione dei consumatori e tutela dell'ambiente. Agli istituti di normazione europei - CEN, CENELEC ed ETSI - spetta invece il compito di stabilire, mediante norme cosiddette "armonizzate", le specifiche tecniche di cui gli operatori hanno bisogno per progettare e fabbricare prodotti conformi ai requisiti essenziali stabiliti dalle direttive.

3.1.5 La direttiva EMC 2004/108/CE

Ogni prodotto destinato al mercato comune europeo, per essere commercializzato deve essere conforme alle direttive a cui risulta soggetto. La conformità autorizza il costruttore ad apporre al *marcatura CE*, condizione indispensabile per l'immissione nel mercato europeo; ciò si attua mediante l'apposizione del *bollino CE* stampigliato in modo permanente sul prodotto stesso o, nel caso non sia possibile, sull'imballo, sul manuale d'uso o sul foglio di garanzia, in modo chiaro e ben visibile. Essendo tale marcatura obbligatoria, e testimoniando la conformità ai requisiti minimi indispensabili all'inserimento del prodotto nel mercato europeo, la marcatura CE non deve essere in alcun caso confusa con un marchio di qualità, di applicazione volontaria e che impegnerebbe il costruttore alla verifica periodica dei requisiti imposti dal tipo marchio scelto. Inoltre, deve essere chiaro che il simbolo CE non deve essere in alcun modo confuso con la direttiva EMC, in quanto stabilisce la conformità del prodotto alle direttive comunitarie a cui tale categoria di prodotti è vincolata. Per tale ragione, possono esservi più direttive coinvolte nell'apposizione della marcatura CE, e fra queste può non esservi la Direttiva EMC.

La Direttiva Europea “Compatibilità elettromagnetica – EMC” 89/336/CEE, applicata in modo volontario dal 1° gennaio 1992 e in modo obbligatorio dal 1° gennaio 1996, ha avuto sicuramente un notevolissimo impatto positivo sulla progettazione e sulla realizzazione degli apparecchi elettrici ed elettronici circolanti nell’ambito dell’Unione Europea.

Tuttavia, la vastità del suo campo di applicazione, definito in modo forse non sufficientemente dettagliato per i tempi (la Direttiva 89/336 è stata una delle prime direttive del nuovo approccio e quella di più vasta applicazione per i tempi di uscita) e l’obbligatorietà per tutti i prodotti delle prove secondo le norme tecniche armonizzate, ovvero ricorrendo all’aiuto di un organismo competente, hanno portato, specialmente nei primi anni di adozione, a difficoltà di interpretazione e ad oneri economici aggiuntivi per la verifica della conformità dei prodotti più diversi.

Già dal 1997 la Commissione Europea decise di intraprendere un lavoro di revisione, e dopo una serie di analisi e atti procedurali venne redatta la nuova Direttiva EMC 2004/108/CE, pubblicata sulla Gazzetta ufficiale dell’Unione Europea n. 390 del 31 dicembre 2004 e successivamente entrata in vigore il 20 luglio 2007.

La nuova Direttiva EMC presenta alcuni aspetti di significativa novità: una migliore definizione del campo di applicazione, con particolare riferimento agli impianti fissi e al grosso macchinario e agli apparecchi e ai sistemi da incorporare in essi; una maggiore libertà nell’adozione della procedura di verifica della conformità degli apparati e dei sistemi ai requisiti essenziali e della conseguente marcatura CE e infine un allineamento di tale procedura a quella prevista da altre Direttive da applicare agli stessi prodotti, in particolare dalla Direttiva Bassa Tensione 2006/95/CE. La nuova Direttiva EMC resta a tutti gli effetti una direttiva del Nuovo Approccio in cui quindi si danno solo i requisiti essenziali da rispettare ma non prescrizioni tecniche specifiche.

La Direttiva EMC si applica a tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche che non siano escluse esplicitamente dal suo campo di applicazione, e quindi anche a tutti gli apparecchi e gli impianti fissi. Esempi di apparati espressamente citati sono elettrodomestici, trasmettitori e ricevitori radio e televisivi, apparecchiature elettromedicali, apparati per l’illuminazione, macchine industriali, apparati della tecnologia dell’informazione. In generale non vengono presi in considerazione invece apparati ritenuti non in grado di emettere perturbazioni elettromagnetiche potenzialmente pericolose per altri apparati o apparati intrinsecamente immuni a perturbazioni; ne sono un esempio apparati radioamatoriali non disponibili sul mercato, lampade ad incandescenza, componenti elettronici privi di una funzione intrinseca ai fini dell’utilizzatore finale.

Essa presenta ora sostanziali differenze in relazione alle procedure di verifica della conformità ai requisiti essenziali. Infatti la nuova Direttiva EMC non prevede più la funzione dell'Organismo Competente nel processo di verifica della conformità, ma ribadisce però l'importanza delle norme tecniche armonizzate, la cui applicazione costituisce una presunzione di conformità. Peraltro l'applicazione delle norme tecniche armonizzate, anche se raccomandata, non è obbligatoria: la conformità può anche essere dimostrata attraverso un'analisi tecnica del progetto condotta dal fabbricante o da un suo esperto.

3.1.6 Norme Armonizzate

Le norme armonizzate sono delle specifiche tecniche adottate da un ente di formazione europeo (CEN, CENELEC, ETSI) sulla base di un mandato della Commissione CE, nel quadro di orientamenti e procedure prestabiliti. Tali norme sono solo volontarie, dato che rappresentano solo una delle possibili vie per ottenere la marcatura CE. Esse tuttavia costituiscono una corsia privilegiata, poiché garantiscono la conformità alle direttive. Il fabbricante può anche realizzare il proprio prodotto in conformità a specifiche tecniche diverse, purché comunque risulti in linea con i requisiti essenziali. In questo caso spetterà a lui dare prova di tale conformità.

Le norme armonizzate possono diventare obbligatorie nei casi in cui la loro osservanza venga imposta da una legge. I riferimenti delle norme armonizzate pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee sono reperibili consultando un'apposita banca dati, disponibile anche su internet. Tale banca dati raccoglie gli estremi (titolo e numero) di tutte le norme europee armonizzate, ricercabili per direttiva CE di riferimento. Le norme armonizzate non si riferiscono né ad un prodotto specifico, né alla sua funzionalità, ma a categorie di prodotto e all'ambiente di utilizzo.

Si possono distinguere in:

- Norme di base
- Norme generiche
- Norme di prodotto

Le norme di base non riguardano i limiti quantitativi relativi ad emissione, immunità e sicurezza, ma stabiliscono condizioni generali su argomenti quali caratteristiche delle strumentazioni da usare nelle prove, ambienti di prova, procedure, etc. Il loro obiettivo è quello di garantire la maggior ripetibilità e consistenza nelle misure possibile, anche in riferimento a standard non europei.

Le norme generiche, appunto come indica il termine, sono norme più "flessibili", di uso più generico e diffuso. Fissano limiti e vincoli relativi a caratteristiche generali del prodotto, in particolare in relazione al suo ambiente di utilizzo. Ad esempio, viene spesso distinta l'industria leggera (in cui l'energia elettrica viene fornita attraverso una linea condivisa da altri impianti, causando maggiori problemi di EMC) dall'industria pesante (nella quale l'approvvigionamento elettrico passa attraverso un'apposita cabina di trasformazione).

Le norme di prodotto, infine, fissano vincoli e limiti legati a specifici tipi di prodotti ed hanno precedenza su quelle di famiglia di prodotto; esse indicano per ogni prova il livello di severità e la sigla della norma di base relativa. Ad esempio la EN 61131-2 è specifica per i controllori programmabili (PLC).

3.1.7 Fullcompliance e pre-compliance

Per "compliance" si intende il rispetto delle norme armonizzate da parte di un prodotto. A partire da questa definizione, è possibile distinguere due tipi di misure: full-compliance e pre-compliance. Le prime sono le misure effettuate da laboratori specializzati, i quali possono condurre delle prove nel pieno del rispetto delle norme e sono autorizzati a produrre certificazioni e rapporti di prova. Le misure di pre-compliance sono, invece, misure prive di riconoscimento ufficiale, che generalmente vengono effettuate nel corso dello sviluppo del prodotto o alla fine di questo processo, per avere maggiori possibilità di superare senza problemi (e in fretta) le prove di certificazione ufficiale.

Le differenze nei due procedimenti si manifestano soprattutto dal punto di vista economico: un laboratorio specializzato propone tariffe molto alte per giornata, periodo che a volte non è sufficiente per portare a termine tutte le prove necessarie. Potendo disporre di strutture (e di personale competente) adatte, un'impresa può effettuare, invece, delle misure di pre-compliance quasi a costo zero, riducendo al minimo le possibilità di non superare immediatamente le prove.

Qualora questa eventualità non si verifichi, infatti, ci si vede costretti ad apportare delle modifiche al prodotto, sperando che siano sufficienti a colmare le lacune messe in luce dalle misure. Ovviamente senza misure di pre-compliance è molto difficile prevedere i comportamenti degli EUT, soprattutto se questi sono particolari o innovativi. D'altro canto, la costruzione di un laboratorio certificato richiede ingenti capitali, dato che non solo è indispensabile acquistare attrezzature molto costose (un analizzatore di spettro può costare diverse decine di migliaia di euro), ma è anche necessario adattare i locali che le conterranno

rendendoli impermeabili ai disturbi e ai campi elettromagnetici provenienti dall'esterno, che altrimenti renderebbero totalmente inaffidabili e inconsistenti le misure, soprattutto quelle legate alle emissioni irradiate.

Proprio per questo motivo, alcuni siti di prova sono collocati in aree geografiche particolari, ad esempio all'interno di una valle, dove i radiodisturbi sono meno consistenti. Ovviamente anche la concessione delle autorizzazioni a produrre certificazioni ha un costo: è infatti necessario un controllo ed una taratura periodica delle attrezzature usate. Sulla base di queste considerazioni, è ovvio che solo poche aziende possono dotarsi di laboratori full-compliance, ed è altresì facile rendersi conto che molte hanno la possibilità avvalersi di strutture di pre-compliance. Tuttavia, le misure di pre-compliance rivestono anche un altro scopo: capita spesso che industrie siano interessate a produrre delle certificazioni non ufficiali in cui affermano che il loro prodotto sia stato progettato e costruito in modo da soddisfare le norme vigenti. Si tratta indubbiamente di un ottimo modo per conferire valore aggiunto al prodotto, e non secondariamente, un modo per evitare di ridurre la competizione sulla qualità ad una competizione su costi e prezzi.

Un buon punto di partenza per l'esecuzione di test EMC è la scelta di una norma di riferimento adatta. Prima di tutto è consigliabile controllare se per l'EUT è prevista una norma di prodotto, altrimenti sarà necessario fare riferimento alle norme di base. Le norme di base per l'immunità forniscono informazione sui setup da utilizzare per riprodurre i fenomeni fisici che possono normalmente interferire con l'EUT, mentre le norme riguardanti la compatibilità danno indicazioni sia sui setup, sia sui limiti alle emissioni elettromagnetiche.

3.2 Analisi dei test EMC: descrizione prove effettuate e risultati ottenuti

I test di compatibilità elettromagnetica ora analizzati sono stati effettuati su una bicicletta elettrica a pedalata assistita in produzione ad un costo inferiore rispetto al precedente modello preso in considerazione nell'analisi motore. Le principali differenze riguardano sostanzialmente il telaio, stavolta in acciaio. Il motore è ancora un DC-brushless da 200W, ma la diversità per quanto riguarda la parte elettrica risiede sostanzialmente nella batteria, ovvero un accumulatore al piombo acido ermetico 36V, 8Ah.

Tutti i test sono stati effettuati ai laboratori IMQ di Bollate (Mi).

3.2.1 La direttiva EN 15194 (Epac)

Le biciclette elettriche a pedalata assistita si muovono prevalentemente nelle strade, nella stessa zona di traffico di auto, autocarri e motocicli. Malfunzionamenti dei sistemi elettronici dovuti ad interferenze nell'area di traffico stradale può comportare notevoli rischi per la sicurezza dell'utente. Nel capitolo 8 della direttiva 97/24/CE, relativa a certi elementi dei veicoli a due o tre ruote tra cui la compatibilità elettromagnetica, il valore di campo elettromagnetico citato per le prove di immunità è molto elevato, arrivando a 30 V/m. Negli standard EN 61000-6-1 e EN 61000-6-3, che sono standard per gli apparecchi residenziali, commerciali e dell'industria leggera, i valori di campo elettromagnetico sono invece 3 V/m, ovvero solamente la decima parte dei valori per l'immunità nei test EMC nelle condizioni stradali. Si intuisce quindi di formulare uno standard adatto al prodotto.

Il 30 aprile 2009, lo standard EN 15194 per le biciclette a pedalata assistita (EPAC, electric power assisted bicycle) viene annunciato ufficialmente dalla NBS (National Standard Boards) di 30 paesi (27 membri della unione europea più Islanda, Norvegia e Svizzera). Esso non è stato pubblicato sulla gazzetta ufficiale europea, ma entra in vigore con la pubblicazione da parte della Commissione per gli Standard Internazionali, e quindi già in vigore in tutti i paesi che oggi hanno già recepito la norma internazionale.

Il sesto mese dopo l'annuncio dello standard tutti i paesi europei e organismi nazionali di normalizzazione dovranno avere recepito la norma EPAC come norma nazionale e le eventuali precedenti norme nazionali devono essere ritirate prima del 31 luglio 2009. L'attuazione varia da paese a paese: in alcuni come Francia e Regno Unito è già obbligatoria per legge, in altre fa parte del recepimento delle norme Europee.

Nel mercato delle e-bike si preannunciano quindi dei cambiamenti: ad esempio non sarà più possibile acquistare e-bike complete o parti di esse in paesi extra europei (ad esempio la Cina) e subito rivenderle in Europa.

Scopo dello standard EN 15194 è quello di coprire biciclette elettriche a pedalata assistita le cui caratteristiche sono descritte dall'articolo 1 punto h della direttiva 2002/24, già citate nel primo capitolo. Esso dà delle specificazioni per tutte le parti elettriche o elettroniche della bici. Ad esempio, vengono specificati i requisiti e i metodi di prova per le batterie (progettate in modo che non vi sia pericolo di incendio o deterioramenti meccanici anche in caso di utilizzo inappropriato, non devono emettere fiamme o sostanze nocive, etc.), per i caricabatterie, per i circuiti elettrici ed i cablaggi, per il sistema di gestione della potenza del motore, oltre che alle etichette da apporre e istruzioni per il manuale d'uso.

La parte che noi analizzeremo sarà quella relativa alle procedure per la compatibilità elettromagnetica. L'appendice C dello standard espone i limiti di riferimento per le emissioni di radiazione elettromagnetica nelle varie prove da effettuare, le procedure di esecuzione dei test e le indica le normative alle quali le procedure fanno riferimento (per avere le istruzioni su come devono essere eseguite).

3.2.2 Strumentazione

Antenne:

l'antenna è una struttura che consente di trasferire un'onda elettromagnetica dallo spazio ad una linea di trasmissione e viceversa. Le sue caratteristiche principali sono :

- impedenza caratteristica: è l'impedenza vista dalla linea di trasmissione a cui è collegata, i cui valori possono essere 50, 75 o 300 Ω . In genere l'antenna viene realizzata per essere adattata a questa impedenza
- frequenza di risonanza: è la frequenza a cui si verifica il migliore adattamento di impedenza con la linea di trasmissione. Le antenne vengono quindi utilizzate solo in un range di frequenze limitato, al di fuori del quale la condizione di buon adattamento di impedenza non è verificata e buona parte della potenza trasmessa viene respinta al trasmettitore.
- Guadagno: è il parametro...
- Diagramma di irradiazione: si tratta di due grafici polari che evidenziano il guadagno dell'antenna nelle diverse direzioni del campo elettrico e del campo magnetico (piano E e piano H)
- Beamwidth: angolo formato dalle direzioni in cui il guadagno scende di 3 dB rispetto al massimo

Le antenne utilizzate nelle prove effettuate sono di tre tipologie:

- antenna biconica, la quale viene impiegata nel range di frequenze 30 – 300 MHz. Ha una lunghezza di circa un metro ed è formata da 8 conduttori piegati a formare una gabbia. Viene alimentata attraverso una linea bifilare o cavo coassiale
- antenna log-periodica, impiegabile nel range di frequenze 200 – 1000 MHz. È caratterizzata da una banda molto larga, e le sue proprietà di impedenza e

irradiazione variano con il logaritmo della frequenza. È un'antenna direttiva, la cui massima radiazione avviene lungo la direzione longitudinale dell'antenna e nel verso in cui la lunghezza degli elementi dell'antenna decresce

- antenna horn, utilizzata per misure nel range 1 – 26 GHz. Si tratta di un'antenna composta da una corta guida d'onda che termina con un tronco piramidale; essendo una guida di tipo multimodale, per le frequenze alte, è dotata di alcuni soppressori di modo per privilegiare un solo modo di trasmissione.

L'ambiente scelto per effettuare le misure EMC è stato la camera anecoica. Essa è formata da una camera schermata con tutte le sei pareti interne rivestite di materiale assorbente, che garantiscono la protezione dai fenomeni meteorologici e da ogni disturbo esterno. Inoltre la possibilità di ottenere la condizione di uniformità di campo (indispensabile per le prove di immunità irradiata). Tipicamente queste strutture hanno un costo molto elevato, dell'ordine dei 300.000 euro e oltre, per cui vengono costruite camere anecoiche per le sole misure di immunità irradiata di piccole dimensioni.

Il materiale anecoico con cui sono rivestite le pareti ha proprietà radio assorbenti, che simula le condizioni di uno spazio aperto. Si tratta nella maggior parte dei casi di tronchi di piramidi costituiti da una miscela di grafite in una matrice di poliuretano, dal tipico colore scuro e aspetto schiumoso.

Descriviamo infine le tipologie del ricevitore utilizzato per le misure di emissione, che sono il *rivelatore di quasi picco* e il *rivelatore di media*. Le diversità di funzionamento dei ricevitori servono ad attribuire ai disturbi l'effettiva pericolosità. Ad esempio il rivelatore di quasi picco fornirà un valore modesto se il disturbo si presenta poco frequentemente. Un rivelatore di quasi picco è costituito da un condensatore che si carica e scarica attraverso un diodo, con una resistenza in parallelo ai capi della quale si effettua la lettura. La scansione dell'intero range di frequenze con tale rivelatore richiede almeno 10 minuti. Affinché la misura sia attendibile e non risenta di effetti dovuti allo strumento di misura, è indispensabile un filtro di preselezione.

Un rivelatore di media è invece sostanzialmente un filtro passa basso, a banda molto stretta, posizionato dopo un classico rivelatore di inviluppo; in tal modo il filtro lascia passare solo la componente continua (o valore medio) dell'inviluppo della forma d'onda. Uno strumento di questo tipo è molto utile quando si vuole isolare segnali continui nascosti all'interno di uno spettro in banda larga.

3.2.3 Prova di emissioni irradiate

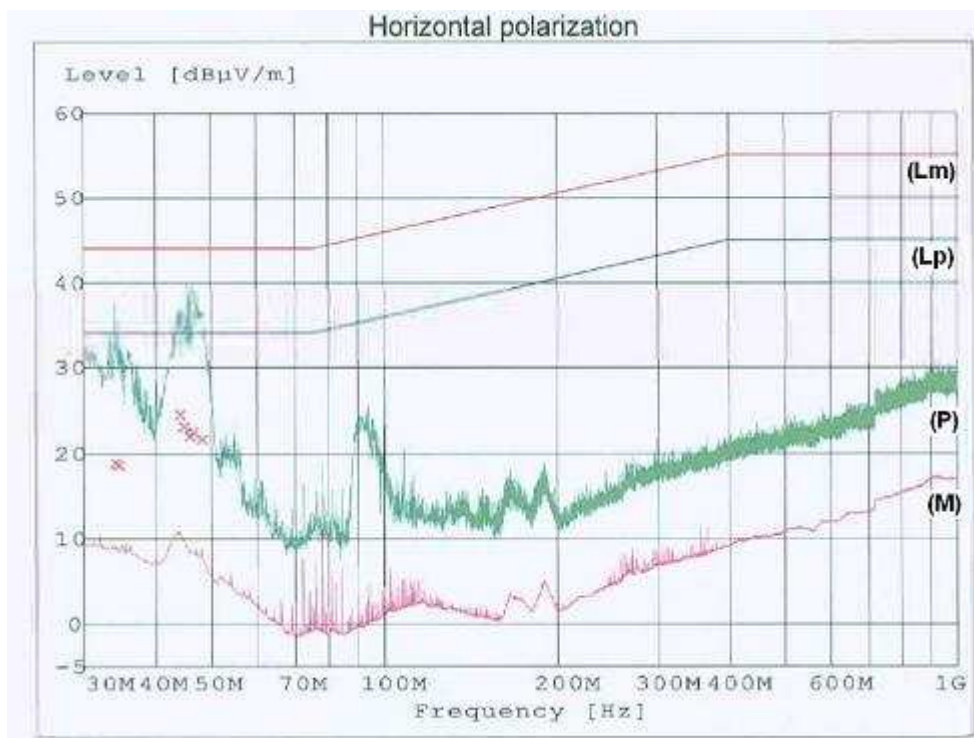
Lo scopo della prova è quello di stabilire che i disturbi emessi dall'EUT (equipment under test, ovvero la nostra bicicletta) siano al di sotto della soglia prevista dalla norma.

Le prove sono state eseguite in accordo con le sotto-clausole C.1.2.2 e C.1.2.3 citate nell'appendice C dello standard EN 15194, quindi i limiti misurati espressi in dB μ V/m devono essere inferiori o uguali a quelli esposti nella tabella C.1 dello standard. La procedura di prova fa riferimento alla sotto-clausola 5 della CISPR 12.

Il test è diviso in due parti, ovvero la misura delle emissioni a banda larga (broadband) e la misura delle emissioni a banda stretta (narrow band). La procedura di misura delle emissioni irradiate richiede il posizionamento dell'EUT (in camera anecoica) su di una tavola rotante in legno, in modo da avere una rotazione di da 0° a 360° nel corso della prova.

La prova si sviluppa nel range di frequenza da 30 MHz a 1 GHz, impiegando un'antenna log-periodica, in due polarizzazioni (orizzontale e verticale). La procedura si ripete per differenti posizioni dell'EUT e sull'insieme dei dati così rilevati si opera, per ogni frequenza, la ricerca del valore massimo misurato ottenendo la curva di emissione caratteristica. Viene usato un rilevatore di media per le misure in banda stretta e un rilevatore di picco per quelle in banda larga.

In fig. 3.5 sono riportati i risultati dei test



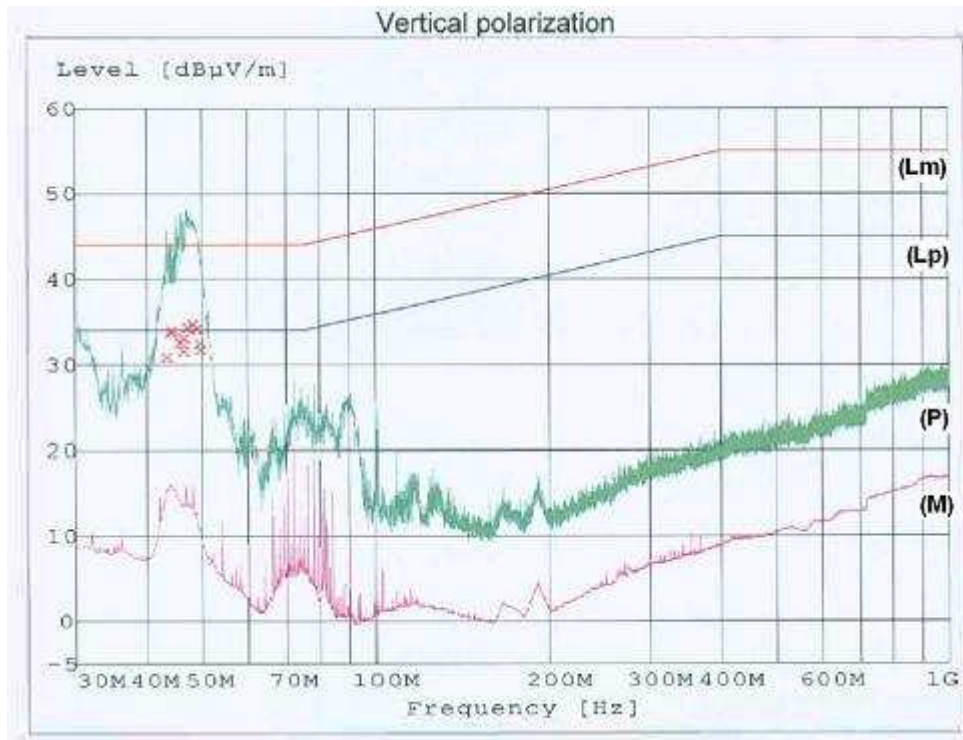


Fig. 3.5

Per entrambe le polarizzazioni sono riportati nello stesso diagramma le rilevazioni di media (M) e di picco (P) con i relativi limiti da rispettare (Lm , Lp). Notiamo come i valori siano sostanzialmente compresi nei limiti; nel range di frequenza 40 MHz – 50 MHz, ove i limiti vengono oltrepassati di poco, le misure sono sostituite con un *rilevatore di quasi-picco*, confermando il superamento del test.

3.2.4 Prove di immunità irradiata

Lo scopo delle prove è verificare l'immunità del sistema dai campi elettromagnetici generati da qualunque altro dispositivo che emetta energia elettromagnetica in modo continuativo, come ad esempio trasmettitori fissi di stazioni radio e televisive, trasmettitori radio su veicoli e varie sorgenti elettromagnetiche industriali. La prova di immunità fornisce come unico risultato la positività o meno del test.

Il test è stato condotto in camera anecoica, seguendo metodi e procedure di esecuzione in accordo con la sotto-clausola C.1.2.4 e C.8 dell'appendice C dello standard EN 15194.

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

Il range di frequenze in cui è stata sviluppata la prova è 20 MHz – 2000 MHz, utilizzando tre diversi tipi di antenne in tre settori, ovvero una bi-conica (20 – 200 MHz), una log-periodica (200 – 1000 MHz) e una horn (1000 – 2000 MHz).

La prova è stata fatta in polarizzazione verticale e orizzontale, con un valore di campo magnetico pari a 30 V/m. Inoltre è stata eseguita una modulazione AM all'80% con portante 1 KHz, per aumentare l'entità del disturbo.

Affinché l'EUT possa essere monitorato durante il test, viene predisposta una telecamera in modo da operare all'esterno della camera anecoica. Il veicolo verrà dichiarato conforme se durante il test non dimostra alcun deterioramento del controllo notevole dall'utente, mentre si trova nelle condizioni di funzionamento citate nella clausola C.4.

Il risultato finale del test effettuato che si è constatato è stata la perfetta conformità della bicicletta elettrica.

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

Conclusioni

Al termine del tirocinio si può affermare che è stata raggiunto un ottimo livello di conoscenze specifiche e dettagliate per quanto riguarda due aspetti delle caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita, ovvero l'analisi del motore e l'analisi delle problematiche riguardanti la compatibilità elettromagnetica.

Il lavoro di tesi svolto ha permesso l'acquisizione di conoscenze fondamentali per una carriera nell'ambito elettronico, anticipando tematiche attualissime che facilmente potranno venire riproposte in ambito accademico o lavorativo.

Tale lavoro sarà inoltre utile come importante documentazione all'azienda produttrice, che per la prima volta si sta confrontando con problematiche inerenti all'elettronica.

Uno degli aspetti più interessanti ed originali sono le documentazioni relative alle prove svolte. I test effettuati sul motore sono sotto un certo punto di vista più "didattici", adatti a confermare quanto si era dimostrato sulla teoria. Ad esempio una misura di cogging potrebbe anche non essere strettamente necessaria in questo prodotto: nei motori ruota non viene richiesto una risposta al controllo estremamente precisa, per cui i bassi valori di coppia di impuntamento rilevati non vanno a costituire un grosso problema per il funzionamento complessivo.

Ben più essenziali sono invece le prove EMC: senza la relativa certificazione di conformità il prodotto non è ritenuto a norma di legge e quindi non può essere immesso nel mercato. I test EMC, benché molto costosi, sono essenziali a prevenire questi problemi e ad evitare sanzioni e dannosi ritiri dal mercato.

Un aspetto di cui non si è parlato in questo lavoro sono le batterie. Essendo un componente fondamentale non solo nelle biciclette ma in tutti i veicoli elettrici, dalle quali dipendono la maggior parte delle caratteristiche principali come peso, potenza ed autonomia del mezzo, necessiterebbero di appositi studi specifici esclusivamente dedicati alle stesse.

- Analisi delle principali caratteristiche elettriche di una bicicletta a pedalata assistita -

Bibliografia

Testi

- [1] L. Bonometti, “*Convertitori di potenza e servomotori brushless*”, Editoriale Delfino, 1996.
- [2] S. Bolognani, “*dispense di azionamenti elettrici I*”, 1995
- [3] S. Stasi, “*Macchina sincrona a magneti permanenti (brushless dc)*”, 2006
- [4] C. R. Paul, “*Compatibilità elettromagnetica – Concetti fondamentali di Elettromagnetismo. Applicazioni progettuali*”, Ulrico Hoepli, 1995
- [5] G. Borio, M. Giunta, V. Pozzolo, “*Applicazioni della direttiva CEE sulla compatibilità elettromagnetica alle apparecchiature elettriche ed elettroniche*”, Corep.
- [6] A. Giovanelli, “*Appunti sulla compatibilità elettromagnetica*”, 2002

Internet

- [7] Wikipedia, l'enciclopedia libera, <http://it.wikipedia.org/>
- [8] Bike Europe, il sito per il business mondiale della bicicletta, <http://www.bike-eu.com/>
- [9] Modern Mechanix, <http://blog.modernmechanix.com/2008/02/01/electric-bike/>