



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO  
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

# UIBM

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| <b>DOMANDA NUMERO</b>     | <b>101995900471907</b> |
| <b>Data Deposito</b>      | <b>17/10/1995</b>      |
| <b>Data Pubblicazione</b> | <b>17/04/1997</b>      |

|                |               |                    |               |                    |
|----------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| <b>Sezione</b> | <b>Classe</b> | <b>Sottoclasse</b> | <b>Gruppo</b> | <b>Sottogruppo</b> |
| H              | 02            | K                  |               |                    |

Titolo

METODO ED APPARATO DI CONTROLLO PER IL PILOTAGGIO DI COMPONENTI ELETTRONICI STATICI ATTI A REALIZZARE LA COMMUTAZIONE DELLE FASI IN UN MOTORE DI TIPO "BRUSHLESS" TRIFASE

Descrizione a corredo di una domanda di brevetto per  
Invenzione Industriale dal titolo:

Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di  
componenti elettronici statici atti a realizzare la  
commutazione delle fasi in un motore di tipo  
"brushless" trifase.

A nome BITRON S.p.A.

di nazionalità italiana

con sede in Grugliasco (TO)/IT.

Inventori designati: 1) DE FILIPPIS Pietro

2) PIAZZA Massimo

Depositata il 17 Ottobre 1995. n° TO 95A000831

Descrizione

La presente invenzione si riferisce ad un metodo per il pilotaggio dei componenti elettronici statici presenti nel circuito di controllo di un motore di tipo "brushless" (ovvero senza spazzole) trifase e ad un apparato di controllo implementante tale metodo.

I motori di tipo "brushless" trifase, nei quali le strutture di statore e rotore sono completate da un commutatore elettronico, che, collegato ad una sorgente di alimentazione in corrente continua e comandato da un sensore di posizione del roto-

re, alimenta le fasi dello statore ciclicamente, generando dei segnali per il pilotaggio di componenti elettronici statici.

Il commutatore elettronico è controllato in modo da alimentare lo statore con delle correnti capaci di creare un campo magnetico sempre ortogonale a quello di rotore prodotto dai magneti, realizzando, così, l'interazione fra campi magnetici e di produzione di coppia tipica dei motori a corrente continua.

Per il funzionamento del motore di tipo "brushless" trifase è dunque necessario realizzare la commutazione delle fasi invertendo opportunamente la corrente nelle varie bobine dello statore: questa funzione viene realizzata per mezzo di componenti elettronici statici (transistori a giunzione, transistori MOSFET, tiristori, IGBT, GTO), che si comportano come un circuito aperto ovvero come un corto circuito, a seconda della posizione angolare del rotore.

Tali componenti elettronici sostituiscono il sistema spazzole-collettore del motore in corrente continua, mentre l'informazione sulla posizione an-

golare del rotore viene ottenuta utilizzando sensori di posizione ad effetto hall, sensori ottici, fotocellule.

La coppia meccanica generata dal motore è pari alla somma delle coppie generate da ciascuna delle tre fasi; ciascuna coppia generata da ogni fase è, a sua volta, proporzionale alla forza elettromotrice ed all'intensità di corrente di fase.

La commutazione delle fasi viene solitamente ottenuta pilotando, con una specifica sequenza, una pluralità di componenti elettronici statici disposti a ponte: la sequenza corretta è quella tale per cui le correnti, interagendo con l'induzione di rotore, producono sempre coppia in uno stesso verso.

Per ridurre la rumorosità (sempre alquanto notevole) di questo tipo di motori elettrici è necessario mantenere una coppia il più possibile costante nel tempo, perché essa altrimenti indurrebbe vibrazioni sulla struttura.

Per quanto detto sopra, ciò si traduce nell'avere andamenti sostanzialmente costanti nel tempo della forza elettromotrice e della corrente di fase.

A tale scopo è possibile intervenire a livello di componenti meccanici ed elettrici: infatti, esistono attualmente motori di tipo "brushless" trifase in cui, progettando opportunamente le caratteristiche fisiche e geometriche dei magneti permanenti del rotore e del circuito magnetico di statore (laminazione), è possibile ottenere un andamento nel tempo della forza elettromotrice di forma trapezoidale: pilotando i componenti elettronici statici negli intervalli di tempo in cui la forza elettromotrice è costante e mantenendo costante la corrente di ogni fase si ottiene una coppia costante relativamente a ciascuna fase. Tuttavia, per mantenere sostanzialmente costante la corrente di ogni fase del motore è necessario utilizzare un azionamento a corrente impressa controllato in catena chiusa.

Allorché servano elevate prestazioni dinamiche è necessario ricorrere a strutture di controllo nelle quali si possa sia controllare con grande precisione il flusso al traferro, sia regolare la coppia in maniera pronta e veloce; il commutatore elettronico a corrente impressa è sostituito allora da un invertitore di tensione del tipo PWM, che opera come

una sorgente di corrente, in quanto provvisto di anelli di regolazione e limitazione della corrente ad un valore prefissato nelle fasi del motore. In tal modo si riesce ad alimentare lo statore della macchina con correnti sinusoidali, con il vantaggio di attenuare l'ondulazione di coppia propria dell'invertitore a corrente impressa a gradini.

E' chiaro che la soluzione con invertitore PWM offre buone prestazioni dal punto di vista del controllo della velocità e dell'ondulazione di coppia del motore, ma la contemporanea regolazione dell'ampiezza della tensione e della frequenza richiede circuiti di controllo dell'invertitore più sofisticati e ricchi di componenti, anche in vista della riduzione del contenuto armonico.

Inoltre, le prestazioni di questo tipo di controllo sono gravate dalla dipendenza della precisione dei parametri del motore e dei dispositivi del sistema di controllo, mentre alla possibilità di interrompere elettronicamente correnti elevate e, di conseguenza, variare opportunamente le forme d'onda di tensione e corrente si affiancano le prerogative intrinseche del motore "brushless" rappresentate

da un controllo rapido, un buon rendimento e dalla silenziosità.

Il rendimento del motore diminuisce all'aumentare delle fluttuazioni della corrente attorno ad un valore prefissato, dunque la necessità di aumentare la frequenza delle commutazioni dei componenti elettronici statici proviene dall'esigenza di limitare le oscillazioni della corrente. Le commutazioni veloci inducono, però, dei transitori di corrente, che sono responsabili di forze istantanee radiali sul traferro della macchina elettrica, la quale, a causa di queste sollecitazioni interne, si deforma provocando rumore.

Scopo della presente invenzione è quello di indicare un metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici atti a realizzare la commutazione delle fasi in un motore di tipo "brushless" trifase, che ovvi agli inconvenienti sopra citati e cioè che, garantendo un controllo rapido della velocità del motore ed a parità di rendimento, sia in grado di ridurre, rispetto all'arte nota, la rumorosità della struttura.

Altro scopo della presente invenzione è quello

di indicare un metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici per la commutazione delle fasi che, limitando la corrente nelle fasi del motore "brushless" ad un valore prefissato, riduca al minimo (e, per quanto possibile, faccia tendere a zero) l'ondulazione di coppia, rispetto alla tecnica nota.

Ulteriore scopo della presente invenzione è quello di realizzare un apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici per la commutazione delle fasi in un motore "brushless" trifase in grado di implementare il metodo precedentemente menzionato.

Non ultimo scopo dell'invenzione è quello di realizzare un apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici di facile ed economica realizzazione, senza l'impiego di tecnologie complesse o costose e con un numero di componenti elettrici e/o elettronici minore rispetto alla tecnica nota.

Tali scopi sono raggiunti da un metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici atti a realizzare la commutazione delle fasi in un motore

di tipo "brushless" trifase secondo la rivendicazione 2, attuabile preferibilmente mediante un apparato di controllo secondo la rivendicazione 1.

In modo vantaggioso, il metodo che è oggetto della presente invenzione, prevede un prolungamento dell'intervallo di tempo durante il quale avvengono le commutazioni dei componenti elettronici statici di controllo del motore trifase.

La durata dell'intervallo del prolungamento di tempo prolungato è tale da permettere l'azzeramento della corrente di una delle fasi del motore (quella che si sta spegnendo).

Inoltre, l'apparato di controllo che implementa preferibilmente il metodo che è oggetto della presente invenzione utilizza una diversa sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici (e, quindi, un diverso commutatore elettronico che genera i segnali di pilotaggio) rispetto all'arte nota ed un minor numero di dispositivi derivatori.

Ulteriori scopi e vantaggi della presente invenzione risulteranno chiari dalla descrizione che segue e dai disegni annessi, forniti a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, in cui:

la figura 1 rappresenta, in un grafico cartesiano, gli andamenti tipici e qualitativi, nel tempo, della forza elettromotrice, della corrente e della coppia di fase di un motore "brushless" trifase;

la figura 2 mostra uno schema a blocchi dell'apparato di controllo del motore "brushless" trifase, secondo la presente invenzione;

la figura 3 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo della corrente di fase del motore nel tempo, nel caso in cui essa venga limitata ad un valore prefissato modulando uno dei due componenti elettronici statici, che, posti in serie, costituiscono ciascun ramo elettrico di conduzione della corrente di fase;

la figura 4 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo della corrente di fase del motore nel tempo, nel caso in cui essa venga limitata ad un valore prefissato modulando contemporaneamente due componenti elettronici statici, che, posti in serie, costituiscono ciascun ramo elettrico di conduzione della corrente di fase;

la figura 5 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo della corrente di fase del motore nel tempo, nel caso in cui essa venga limitata ad un valore prefissato modulando alternativamente i due componenti elettronici statici, che, posti in serie, costituiscono ciascun ramo elettrico di conduzione della corrente di fase;

la figura 6 illustra schematicamente l'andamento qualitativo nel tempo di una prima sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici, supponendo che non intervenga il dispositivo derivatore che limita la corrente di fase;

la figura 7 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo nel tempo delle tre correnti di fase relative alla prima sequenza di pilotaggio di cui alla figura 6;

la figura 8 mostra un particolare ingrandito del grafico cartesiano di figura 7;

la figura 9 illustra schematicamente l'andamento qualitativo nel tempo di una seconda sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici, supponendo che intervenga il dispositivo deri-

vatore che limita la corrente di fase;

la figura 10 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo nel tempo delle tre correnti di fase relative alla seconda sequenza di pilotaggio di cui alla figura 9;

la figura 11 illustra schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo nel tempo della corrente che passa nel dispositivo derivatore presente nell'apparato di controllo, secondo l'invenzione;

la figura 12 mostra schematicamente un particolare ingrandito del grafico cartesiano di figura 9;

la figura 13 illustra schematicamente, in un grafico cartesiano, gli andamenti qualitativi nel tempo delle correnti di fase relativamente al particolare ingrandito del grafico di figura 12;

la figura 14 illustra schematicamente, in un grafico cartesiano, un particolare di una terza sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici, secondo la presente invenzione;

la figura 15 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, gli andamenti qualitativi nel tempo delle correnti di fase relativamente al parti-

colare della terza sequenza di pilotaggio di figura 14, secondo la presente invenzione;

la figura 16 illustra schematicamente la configurazione delle fasi del motore, nel caso in cui i segnali che arrivano ai componenti elettronici statici, che costituiscono ciascun ramo di conduzione della corrente di fase, siano sincronizzati ed entrambi i componenti siano chiusi;

la figura 17 illustra schematicamente la configurazione delle fasi del motore, nel caso in cui i segnali che arrivano ai componenti elettronici statici, che costituiscono ciascun ramo di conduzione della corrente di fase, siano sincronizzati ed entrambi i componenti siano aperti;

la figura 18 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, l'andamento qualitativo nel tempo della sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici dell'apparato di controllo, secondo la presente invenzione;

la figura 19 illustra schematicamente, in un grafico cartesiano, gli andamenti qualitativi nel tempo delle correnti di fase del motore relativamente alla terza sequenza di pilotaggio dei componenti

elettronici statici, secondo la presente invenzione;

la figura 20 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, gli andamenti qualitativi delle correnti di fase e della coppia del motore, relativamente alla seconda sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici di figura 9;

la figura 21 rappresenta schematicamente, in un grafico cartesiano, gli andamenti qualitativi delle correnti di fase e della coppia del motore, relativamente alla terza sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici di figura 18, secondo la presente invenzione.

Con riferimento alle figure menzionate, con FM è indicato l'andamento qualitativo (nel tempo  $t$ ) della forza elettromotrice di un motore "brushless" trifase MT, con IF è indicato genericamente l'andamento della corrente di fase, con CF quello della coppia di fase.

L'apparato di controllo del motore MT, secondo l'invenzione, è indicato complessivamente con CM, mentre con T1, T2, T3, B1, B2, B3 sono indicati i componenti elettronici statici atti alla commutazione delle fasi, ciascuno posto elettricamente in pa-

rallelo ad un diodo di ricircolo della corrente (questi ultimi sono indicati, rispettivamente, con D1, D2, D3, D1', D2', D3'). Con RS è indicato un dispositivo derivatore, con VS la tensione applicata ai capi del suddetto dispositivo derivatore RS, con GS il commutatore elettronico, che riceve informazioni sulla posizione angolare del rotore del motore MT, tramite i sensori di posizione H1, H2, H3 e genera, di conseguenza, i segnali atti a pilotare la commutazione dei componenti T1, T2, T3, B1, B2, B3, con I1, I2, I3, rispettivamente, le correnti di ciascuna delle tre fasi. Con V è indicata la somma delle tensioni presenti ai capi di una coppia di componenti elettronici statici T1, B1 (ovvero T2, B2; ovvero T3, B3) e della tensione VS presente ai capi del derivatore RS (proporzionale alla corrente che percorre dett derivatore RS).

Con particolare riferimento ai grafici cartesiani riprodotti nelle figure 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, con I è indicata genericamente l'intensità di corrente di fase, con C la coppia di fase, con t il tempo, con T1', T2', T3', B1', B2', B3' sono indicate le forme d'onda dei

segnali (relativi, rispettivamente, ai componenti elettronici statici  $T_1, T_2, T_3, B_1, B_2, B_3$ ) di una prima sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici  $T_1, T_2, T_3, B_1, B_2, B_3$ , con  $T_1'', T_2'', T_3'', B_1'', B_2'', B_3''$  le forme d'onda dei segnali di una seconda sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici  $T_1, T_2, T_3, B_1, B_2, B_3$ , con  $T_1''', T_2''', T_3''', B_1''', B_2''', B_3'''$  le forme d'onda dei segnali di una terza sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici  $T_1, T_2, T_3, B_1, B_2, B_3$ , secondo la presente invenzione.

Analogamente, con  $I_1', I_2', I_3'$  sono indicate le forme d'onda delle correnti di fase relativamente alla prima sequenza di pilotaggio, con  $I_1'', I_2'', I_3''$  le forme d'onda delle correnti di fase relativamente alla seconda sequenza di pilotaggio, con  $I_1''', I_2''', I_3'''$  le forme d'onda delle correnti di fase relativamente alla terza sequenza di pilotaggio (secondo la presente invenzione) e con  $IRS''$  la corrente circolante all'interno del dispositivo derivatore RS, relativamente alla seconda sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici  $T_1, T_2, T_3, B_1, B_2, B_3$ . Con  $C''$  e  $C'''$  sono indicate,

inoltre, le forme d'onda della coppia di fase, rispettivamente relative alla seconda ed alla terza sequenza di pilotaggio. Con M ed M1 sono indicati gli intervalli di tempo in cui i componenti elettronici statici sono chiusi (relativamente e rispettivamente alla seconda ed alla terza sequenza di pilotaggio), mentre con M2 è indicata la differenza tra l'intervallo di tempo M1 (relativo alla terza sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3) e l'intervallo di tempo M (relativo alla seconda sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3).

La commutazione delle fasi del motore "brushless" trifase MT è ottenuta pilotando con una sequenza opportuna (scandita dal generatore di segnali GS) sei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3, disposti a ponte.

Per limitare la corrente I1, I2, I3 nelle fasi del motore MT ad un valore prefissato si utilizza una tecnica del tipo "PWM" ("modulazione a larghezza di impulso"): si interrompe il pilotaggio dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1,

B2, B3 quando la tensione VS supera un valore massimo corrispondente alla corrente da limitare. In qualsiasi istante della sequenza di pilotaggio si ha continuità in un ramo elettrico costituito dalla serie di due componenti elettronici statici T1, B2 o B3 (ovvero T2, B1 o B3; ovvero T3, B1 o B2), due fasi del motore MT e il derivatore RS; il ramo elettrico suddetto è alimentato dalla tensione V del ponte elettrico. La limitazione della corrente del ramo elettrico considerato si effettua modulando (mediante la tecnica "PWM") alternativamente il primo ed il secondo componente elettronico statico (T1, B2 o B3; ovvero T2, B1 o B3; ovvero T3, B1 o B2), che fanno parte del ramo.

Ciò permette di ottenere una forma d'onda di corrente di fase simmetrica nel tempo e con oscillazioni limitate rispetto al valore massimo.

In seguito si prenderanno in considerazione alcune sequenze di pilotaggio e le corrispondenti forme d'onda di corrente: per queste ultime è stato possibile confrontare i risultati ottenuti utilizzando un programma di simulazione elettronica ("SPICE") con i risultati sperimentali, ottenuti

avendo a disposizione un prototipo dell'apparato di controllo CM, comprendente un motore "brushless" trifase MT utilizzato per elettrodomestici.

Inoltre, per ogni grafico cartesiano, viene preso in considerazione e raffigurato un particolare intervallo di tempo durante il quale viene mostrata la variazione di alcune grandezze fisiche: resta inteso che al di fuori del suddetto intervallo di tempo raffigurato l'andamento delle grandezze fisiche di interesse si ripete con periodicità costante, ove non sia specificato altrimenti.

Data la sequenza di pilotaggio ad onda quadra  $T1'$ ,  $T2'$ ,  $T3'$ ,  $B1'$ ,  $B2'$ ,  $B3'$  di figura 6 (il segnale di tensione o di corrente "alto" corrisponde al componente elettronico statico  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  chiuso (corto circuito), mentre il segnale "basso" corrisponde al componente elettronico statico  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  aperto (circuito aperto)) e supponendo che non intervenga il dispositivo derivatore RS, che limita le correnti di fase  $I1$ ,  $I2$ ,  $I3$ , si ottengono le forme d'onda  $I1'$ ,  $I2'$ ,  $I3'$  di figura 7.

Analizzando i grafici di figura 6 e di figura

7, si può osservare che le correnti di fase  $I_1'$ ,  $I_2'$ ,  $I_3'$  presentano un particolare andamento in prossimità delle commutazioni da segnale "alto" a segnale "basso" o viceversa dei componenti elettronici statici  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ .

In particolare, in figura 8 è mostrato l'andamento delle correnti di fase  $I_1'$ ,  $I_2'$ ,  $I_3'$  in corrispondenza della commutazione dei componenti elettronici statici  $T_1$ ,  $B_3$ ,  $B_2$ : la corrente  $I_3'$  si azzerava attraverso il diodo di ricircolo  $D_3$ ; la corrente  $I_2'$  inizia ad aumentare (in valore assoluto); la corrente  $I_1'$  (somma algebrica delle correnti  $I_2'$  e  $I_3'$ ) diminuisce (in valore assoluto) in corrispondenza dell'intervallo di tempo dove prevale l'azzeramento della corrente  $I_3'$ , quindi riprende ad aumentare (sempre in valore assoluto) seguendo l'andamento della corrente  $I_2'$ .

Data l'elevata tensione  $V$  di alimentazione del ponte e la bassa resistenza degli avvolgimenti delle fasi del motore  $MT$ , è necessario, tuttavia, l'intervento del dispositivo derivatore  $RS$  (costituito, in pratica, da uno "shunt", che limita la corrente nelle fasi del motore ad un valore

prefissato). In questo caso la sequenza di pilotaggio dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3 diventa quella di figura 9 (T1'', T2'', T3'', B1'', B2'', B3'') e le corrispondenti forme d'onda di corrente di fase I1'', I2'', I3'' diventano quelle di figura 10.

Analizzando il grafico di figura 10 si osserva che le correnti I1'', I2'', I3'' presentano un transitorio di breve durata (un "guizzo" di corrente o "spike") in corrispondenza delle commutazioni dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3. Durante queste commutazioni si perde il controllo della corrente, perché intervengono i diodi di ricircolo D1, D2, D3, D1', D2', D3' e, quindi, la corrente delle fasi I1'', I2'', I3'' non è la stessa corrente IRS'' che passa nel dispositivo derivatore RS. La corrente IRS'' che fluisce nel dispositivo derivatore RS, infatti, presenta un andamento nel tempo che viene mostrato in figura 11: si azzerà ad ogni commutazione dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3 e, durante l'intervallo di tempo in cui il dispositivo derivatore RS non interviene (perché la sua corrente IRS'' non supera il

valore limite), la corrente di ogni fase  $I1''$ ,  $I2''$ ,  $I3''$  è data dalla somma delle correnti del dispositivo derivatore RS ( $IRS''$ ) e del diodo di ricircolo  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ ,  $D1'$ ,  $D2'$ ,  $D3'$ , nel quale passa la corrente della fase  $I1''$ ,  $I2''$ ,  $I3''$  che si sta spegnendo.

Il fenomeno può essere meglio osservato espandendo le forme d'onda delle correnti di fase  $I1''$ ,  $I2''$ ,  $I3''$  (figura 13) e dei segnali di pilotaggio  $T1''$ ,  $B3''$ ,  $B2''$  (figura 12), in corrispondenza della commutazione degli interruttori  $T1$ ,  $B3$ ,  $B2$ .

Si nota un incremento (in valore assoluto) della corrente  $I2''$ , una diminuzione (in valore assoluto) della corrente  $I3''$ , mentre la corrente  $I1''$  (somma algebrica di  $I2''$  e di  $I3''$ ) inizia ad aumentare (sempre in valore assoluto) dove prevale l'aumento di  $I2''$  rispetto alla diminuzione di  $I3''$ , poi riprende a diminuire (in valore assoluto) seguendo l'andamento della corrente  $I2''$ .

Per non perdere il controllo della corrente durante le commutazioni dei componenti elettronici statici  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  bisogna evitare che la fase si spenga liberamente attraverso il diodo di

ricircolo D1, D2, D3, D1', D2', D3'. Ciò viene ottenuto prolungando (rispetto all'arte nota) di un opportuno intervallo di tempo M2 la durata dell'intervallo di tempo M (calcolato secondo l'arte nota) di pilotaggio dei componenti elettronici statici T1, T2, T3, B1, B2, B3. Il pilotaggio viene sempre effettuato utilizzando un segnale modulato con tecnica di modulazione "PWM".

L'intervallo di tempo M2 in questione deve permettere l'azzeramento della corrente di fase I3'', ma non deve essere superiore al tempo che impiega un elemento del motore MT a passare da un riferimento di posizione relativa (tra parti dell'induttore e dell'indotto) ad un altro riferimento di posizione relativa distante 30 gradi elettrici, in modo da non creare coppia di fase CF negativa, a causa dell'inversione di segno della forza elettromotrice FM del motore MT.

Nelle figure 14 e 15 sono riportate le forme d'onda dei segnali di pilotaggio T1'', B3'', B2'' e delle corrispondenti correnti di fase I1'', I2'', I3'', in prossimità della commutazione dei componenti elettronici statici T1, B3, B2, che ven-

gono pilotati secondo l'invenzione.

Nelle figure 18 e 19 sono riportate, rispettivamente, la sequenza di pilotaggio  $T1'''$ ,  $T2'''$ ,  $T3'''$ ,  $B1'''$ ,  $B2'''$ ,  $B3'''$  completa per tutti i componenti elettronici statici  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  e le forme d'onda delle correnti di fase  $I1'''$ ,  $I2'''$ ,  $I3'''$ .

Durante l'intervallo di tempo di modulazione  $M2$  (differenza tra l'intervallo di tempo di modulazione  $M1$  di figura 18, relativo alla strategia di pilotaggio secondo la presente invenzione e l'intervallo di tempo di modulazione  $M$  di figura 9, relativo alle strategie di pilotaggio note) i segnali di pilotaggio  $T1'''$  e  $B3'''$  sono sincronizzati, per cui le fasi del motore  $MT$  possono assumere due diverse configurazioni: la prima relativa a segnali di pilotaggio  $T1'''$ ,  $B3'''$  "alti" (figura 16), la seconda relativa a segnali di pilotaggio  $T1'''$ ,  $B3'''$  "bassi" (figura 17).

In figura 18, così come in figura 9, sono indicati gli intervalli di tempo di modulazione  $M$ ,  $M1$  e la differenza di intervallo di tempo  $M2=M1-M$  solamente in corrispondenza della commutazione dei com-

ponenti elettronici statici T1, B3, B2 per chiarezza di rappresentazione; le stesse definizioni valgono ugualmente per tutte le altre commutazioni dei componenti T1, T2, T3, B1, B2, B3 presenti nell'apparato CM (e visibili, ad intervalli di tempo periodici, nelle figure 9 e 18 citate in precedenza).

Analizzando le figure 15, 16 e 17 è possibile osservare che:

- la corrente di fase I3''' diminuisce di un primo valore nella seconda configurazione (quella di figura 17) di fase del motore ed aumenta di un secondo valore nella prima configurazione (quella di figura 16); riesce comunque ad azzerarsi, in quanto il valore assoluto di detto primo valore relativo alla seconda configurazione è maggiore del valore assoluto di detto secondo valore relativo alla prima configurazione;

- la corrente di fase I2''' continua a crescere sino al valore limite di corrente imposto dal dispositivo derivatore RS, in quanto la fase corrispondente alla corrente I2''', nel passaggio da una configurazione all'altra, non subisce alcuna variazione

elettrica;

- la corrente di fase  $I_{1''''}$ , somma algebrica delle correnti di fase  $I_{2''''}$  e  $I_{3''''}$ , non presenta più il transitorio rapido (lo "spike"), ma rimane sempre sotto il valore limite di corrente imposto dal dispositivo derivatore RS.

Nelle figure 20 e 21 sono messi a confronto i grafici dell'andamento nel tempo  $t$  delle coppie totali  $C''$ ,  $C'''$  del motore MT ottenuti, rispettivamente, con le sequenze di pilotaggio di figura 6 e di figura 18. Si nota che, utilizzando la strategia di pilotaggio secondo l'invenzione (quella di figura 18), l'ondulazione di coppia totale diminuisce notevolmente. Lo stesso miglioramento (qui visibile) dal punto di vista meccanico lo si può apprezzare anche dal punto di vista del rumore, poiché l'ondulazione di coppia induce vibrazioni sulla struttura. Inoltre, il rumore di commutazione viene sostanzialmente ridotto, poiché vengono limitate le commutazioni veloci, che inducono rapidi transitori di corrente di fase (gli "spikes"), i quali, a loro volta, provocano forze istantanee radiali al traferro della macchina elettrica, scarsa centrifugazione della coppia

attiva, sollecitazioni interne con deformazioni della struttura e conseguente rumore acustico.

I risultati sperimentali sin qui riportati sono stati rilevati in condizioni di bassa velocità di rotazione del motore "brushless" trifase MT e con un segnale di pilotaggio dei componenti elettronici statici modulato con tecnica PWM avente frequenza pari a 20 kHz.

Nel caso di macchine elettriche che presentano una caratteristica coppia-velocità in cui la coppia è inversamente proporzionale alla velocità del motore si possono ottenere gli stessi risultati sperimentali anche ad alte velocità di rotazione a patto di aumentare la frequenza del segnale di pilotaggio dei componenti elettronici statici modulato con tecnica PWM.

Dalla descrizione effettuata risultano chiare le caratteristiche del metodo e dell'apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici, che sono oggetto della presente invenzione, così come chiari ne risultano i vantaggi.

In particolare, essi sono rappresentati da:

- riduzione dell'ondulazione di coppia di fase

e totale nel tempo, rispetto alle soluzioni note, con conseguente riduzione della rumorosità del motore "brushless" trifase;

- riduzione dei transitori di corrente di fase, rispetto all'arte nota, grazie ad una riduzione delle commutazioni veloci dei componenti elettronici statici;

- riduzione, rispetto alla tecnica nota, delle forze istantanee radiali sul traferro del motore, con conseguente centrifugazione della coppia di fase, diminuzione delle sollecitazioni interne, delle deformazioni della struttura e del rumore acustico;

- semplificazione, rispetto alle tecniche adottate sinora, dell'apparato di controllo per il pilotaggio dei componenti elettronici statici, in quanto viene utilizzato un solo dispositivo derivatore all'interno dell'apparato, in luogo di un numero di dispositivi derivatori pari al numero delle fasi del motore;

- costi minori rispetto alle soluzioni adottate nella tecnica nota.

E' chiaro, infine, che numerose varianti possono essere apportate al metodo ed all'apparato di

controllo per il pilotaggio dei componenti elettronici statici, che è oggetto della presente invenzione, senza per questo uscire dai principi di novità insiti nell'idea inventiva, così come è chiaro che, nella pratica attuazione dell'invenzione, i materiali, le forme e le dimensioni dei dettagli illustrati potranno essere qualsiasi a seconda delle esigenze e gli stessi potranno essere sostituiti con altri tecnicamente equivalenti.

## RIVENDICAZIONI

1. Apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici atti a realizzare la commutazione delle fasi in un motore "brushless" trifase, del tipo comprendente:

- almeno un motore "brushless" trifase MT, alimentato da almeno un generatore di tensione (V);

- una pluralità di componenti elettronici statici (T1, T2, T3, B1, B2, B3), che realizzano la commutazione delle fasi invertendo la corrente nelle bobine dello statore di detto motore (MT), detti componenti elettronici statici (T1, T2, T3, B1, B2, B3) essendo disposti a ponte ed ognuno essendo posto in parallelo ad almeno un diodo (D1, D2, D3, D1', D2', D3') di ricircolo della corrente di fase (IF, I1, I2, I3);

- almeno un dispositivo generatore di segnali (GS), che preleva informazioni provenienti da una pluralità di sensori di posizione (H1, H2, H3), i quali sono posti sul motore (MT) e rilevano le posizioni angolari del rotore di detto motore (MT), detto dispositivo generatore di segnali (GS) pilotando, tramite segnali elettrici digitali, la commutazione

da circuito aperto a corto circuito o viceversa di detti componenti elettronici statici ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ), secondo una determinata sequenza di pilotaggio, in modo che, in qualsiasi istante di detta sequenza di pilotaggio, si abbia continuità elettrica in almeno un ramo del circuito elettrico comprendente almeno due componenti elettronici statici ( $T_1$ ,  $B_2$  o  $B_3$ ;  $T_2$ ,  $B_1$  o  $B_3$ ;  $T_3$ ,  $B_1$  o  $B_2$ ) e si rilevino almeno due fasi del motore (MT);

- una pluralità di dispositivi derivatori (RS), in numero pari al numero delle fasi di detto motore (MT), posti tutti in parallelo tra loro e collegati a detto dispositivo generatore di segnali (GS) ed a detti componenti elettronici statici ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ), la tensione (VS) presente ai capi di detti dispositivi derivatori (RS) essendo proporzionale alla corrente che percorre detti derivatori (RS),

caratterizzato dal fatto che detti dispositivi derivatori (RS) sono sostituiti da un unico dispositivo derivatore (RS), che viene utilizzato per limitare almeno una delle correnti di fase ( $I_F$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) del motore (MT) ad un valore limite prefissato,

detto dispositivo generatore di segnali (GS) interrompendo la commutazione di detti componenti elettronici statici (T1, T2, T3, B1, B2, B3) quando la tensione (VS) presente ai capi di detto dispositivo derivatore (RS) supera un predeterminato valore corrispondente al prodotto fra l'impedenza di detto dispositivo derivatore (RS) e detto valore limite prefissato di corrente, detta limitazione della corrente di fase (IF, I1, I2, I3) del motore (MT) essendo effettuata utilizzando una tecnica del tipo "PWM" ("modulazione a larghezza di impulso"), modulando alternativamente due componenti elettronici statici (T1, B2 o B3; T2, B1 o B3; T3, B1 o B2), che sono compresi nel ramo di circuito elettrico dove si ha continuità in qualsiasi istante di detta sequenza di pilotaggio.

2. Metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici atti a realizzare la commutazione delle fasi in un motore "brushless" trifase, del tipo utilizzato in un apparato di controllo come alla rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere le seguenti fasi:

- generazione di segnali elettrici digitali di

pilotaggio, da parte di detto dispositivo generatore di segnali (GS), che comandano l'apertura o la chiusura di detti componenti elettronici statici (T1, T2, T3, B1, B2, B3), secondo una sequenza di pilotaggio prestabilita, tale che, in qualsiasi istante di detta sequenza di pilotaggio si abbia un ramo di circuito elettrico costituito dalla serie di almeno due componenti elettronici statici (T1, B2 o B3; T2, B1 o B3; T3, B1 o B2) ed almeno due fasi di detto motore (MT);

- modulazione, in tecnica "PWM" ("modulazione a larghezza di impulso"), alternativamente, dell'uno e dell'altro di detti due componenti elettronici statici (T1, B1; T2, B2; T3, B3), al fine di limitare la corrente di fase (IF, I1, I2, I3) del motore (MT) ad un valore prefissato ed in modo da ottenere una forma d'onda di corrente di fase (IF, I1, I2, I3) periodica, simmetrica e con ondulazioni limitate rispetto all'andamento di un'onda quadra, detta modulazione essendo effettuata per un prefissato intervallo di tempo (M1) superiore ad un primo intervallo di tempo (M) di modulazione adottato nella tecnica nota, un secondo intervallo di tempo

(M2), costituito dalla differenza fra detto secondo (M1) e detto primo intervallo di tempo (M), essendo tale da permettere l'azzeramento di almeno una delle correnti di fase (IF, I1, I2, I3) che si sta spegnendo.

3. Metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detto secondo intervallo di tempo (M2) è inferiore al tempo che impiega un elemento di riferimento di detto motore (MT) a passare da una prima posizione, relativa a parti dell'induttore e dell'indotto, ad una seconda posizione, relativa a parti dell'induttore e dell'indotto, distante 30 gradi elettrici da detta prima posizione, in modo da evitare di creare coppia di fase (CF) negativa, a causa dell'inversione di segno della forza elettromotrice (FM) del motore (MT).

4. Metodo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che, durante detto secondo intervallo di tempo (M2), i segnali di pilotaggio di almeno due di detti componenti elettronici statici

(T1, T2, T3, B1, B2, B3) sono sincronizzati, in modo che le fasi del motore (MT) possono assumere almeno due diverse configurazioni, corrispondenti ad almeno due diversi livelli di tensione o di corrente di detti segnali elettrici digitali di pilotaggio.

5. Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo le rivendicazioni 1 o 2, caratterizzato dal fatto che l'andamento nel tempo della coppia totale (C''') del motore (MT) presenta minori ondulazioni ed ondulazioni di minore ampiezza rispetto all'andamento nel tempo della coppia totale (C'') di un motore "brushless" trifase a commutazione delle fasi ottenuta mediante un metodo di pilotaggio ed un apparato di controllo appartenenti alla tecnica nota.

6. Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo le rivendicazioni 1 o 5, caratterizzato dal fatto che la rapidità delle commutazioni di detti componenti elettronici statici (T1, T2, T3, B1, B2, B3), le vibrazioni sulla struttura del motore (MT), la frequenza dei transitori delle correnti di fase (IF, I1, I2, I3), le forze istantanee indotte, radiali al

traferro della macchina elettrica, le sollecitazioni interne, le conseguenti deformazioni ed il rumore acustico provocato vengono ridotti rispetto alle corrispondenti grandezze fisiche di un motore "brushless" trifase a commutazione delle fasi ottenuta mediante un metodo di pilotaggio ed un apparato di controllo appartenenti alla tecnica nota.

7. Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo le rivendicazioni 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detta modulazione viene effettuata con tecnica del tipo "PWM" ("modulazione a larghezza di impulso"), utilizzando un segnale avente frequenza pari a 20 kHz, in condizioni di basse velocità di rotazione del motore (MT).

8. Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici secondo le rivendicazioni 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detto motore (MT) presenta un andamento della caratteristica coppia-velocità in cui la coppia è inversamente proporzionale alla velocità e detta modulazione viene effettuata con una tecnica del tipo "PWM" ("modulazione a larghezza di impulso"),

utilizzando un segnale avente frequenza superiore a 20 kHz, in condizioni di alte velocità di rotazione di detto motore (MT).

9. Metodo ed apparato di controllo per il pilotaggio di componenti elettronici statici come sostanzialmente descritto ed illustrato nei disegni allegati.

p. inc. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.

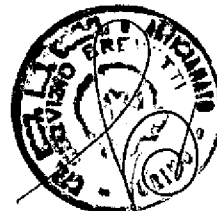
G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni

A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti

M. Giuli - A. Zappella

(firma)

*[Handwritten signature]*  
(per sé e per gli altri)



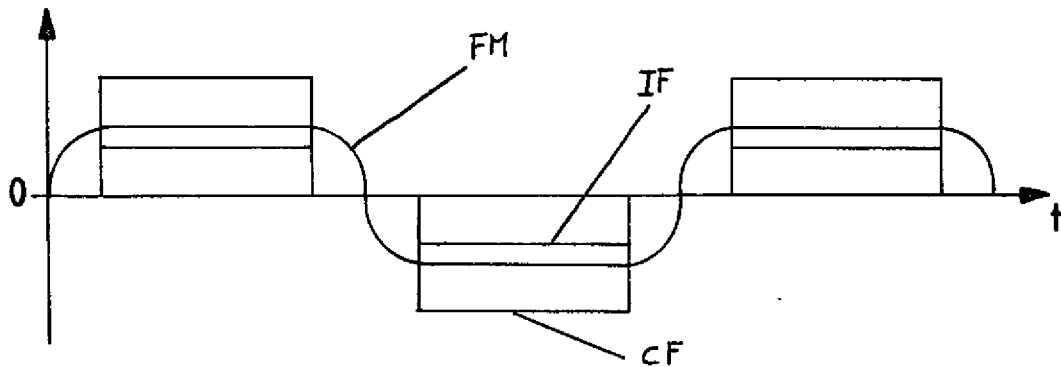


Fig. 1

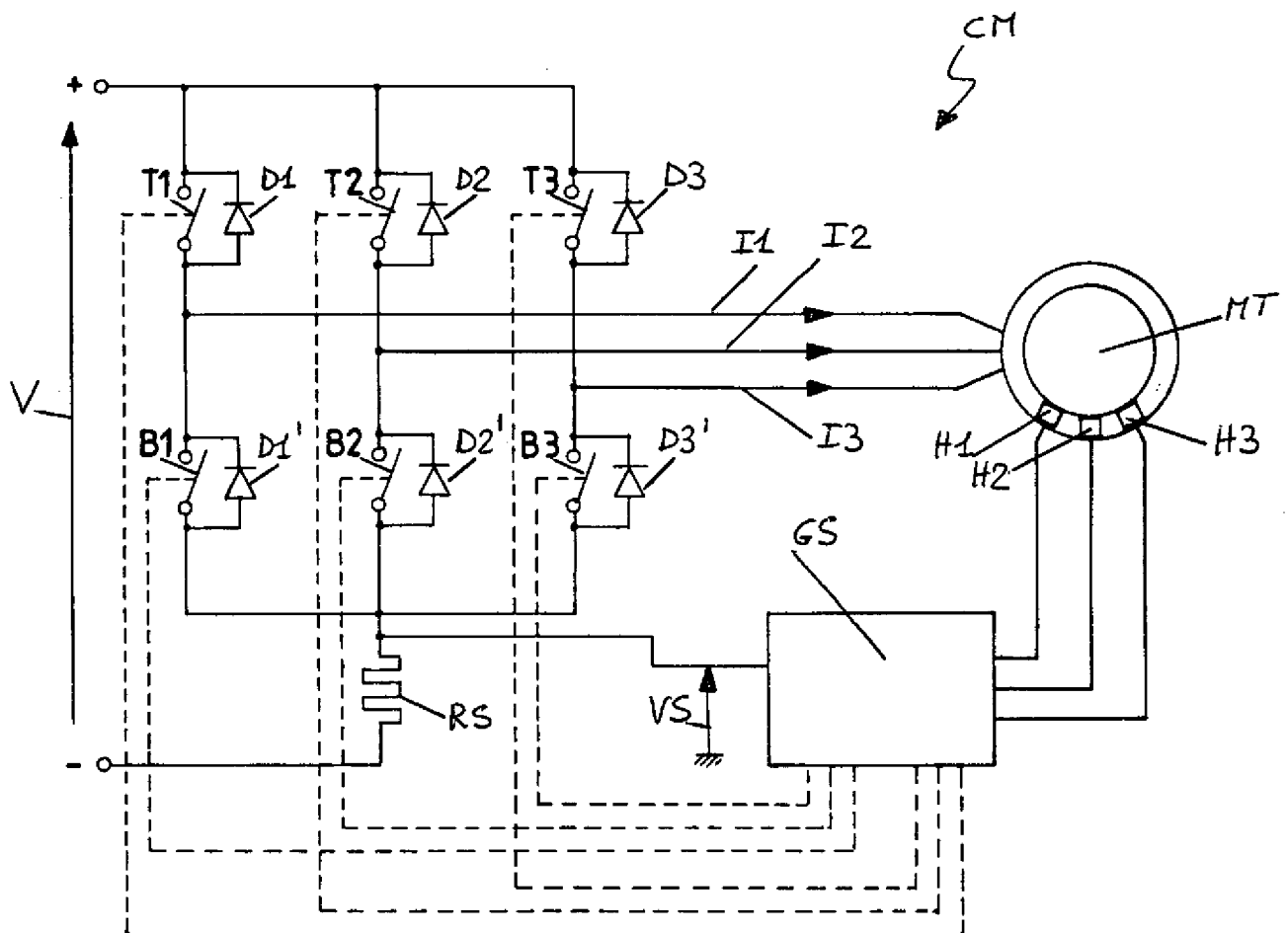


Fig. 2

p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.

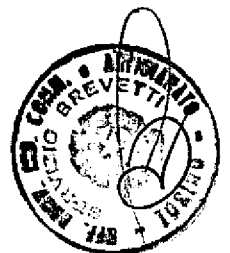
G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni

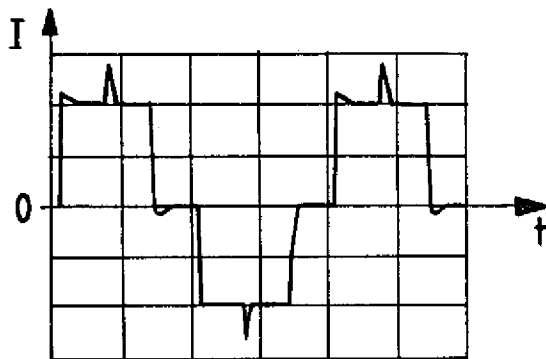
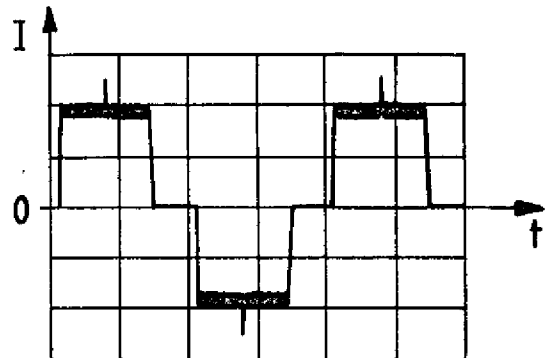
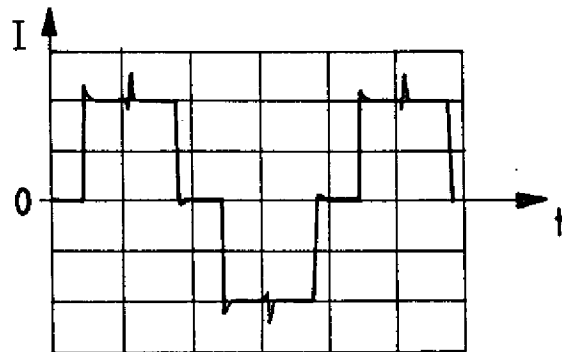
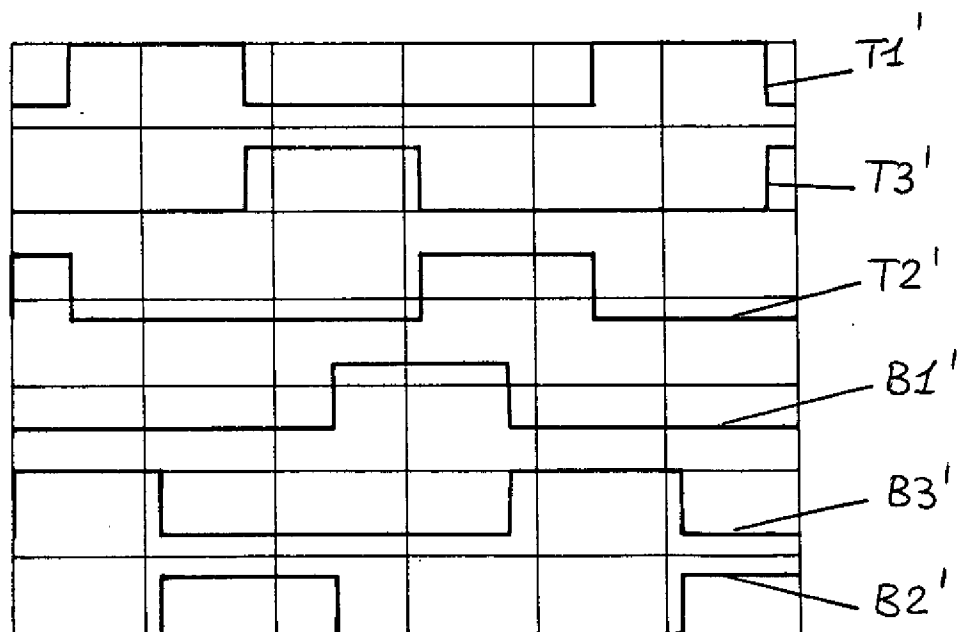
A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Feravanti

M. Giuli - A. Zappella

(firma)

*[Signature]*  
(per sé e per gli altri)



Fig. 3Fig. 4Fig. 5Fig. 6

p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.  
 G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni  
 A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti  
 M. Giuli - A. Zappella

(firma)

(per sè e per gli altri)



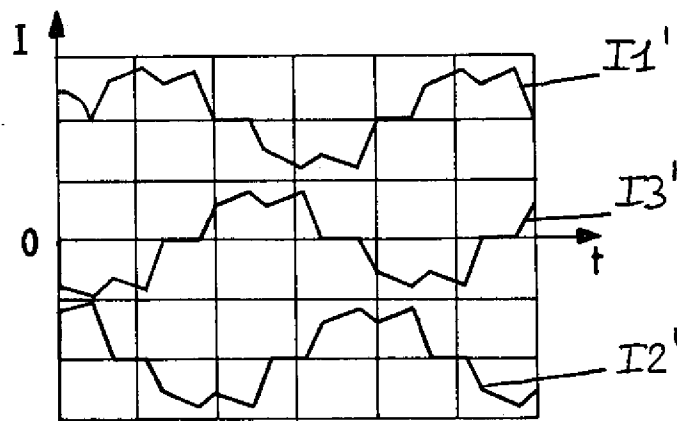


Fig. 7

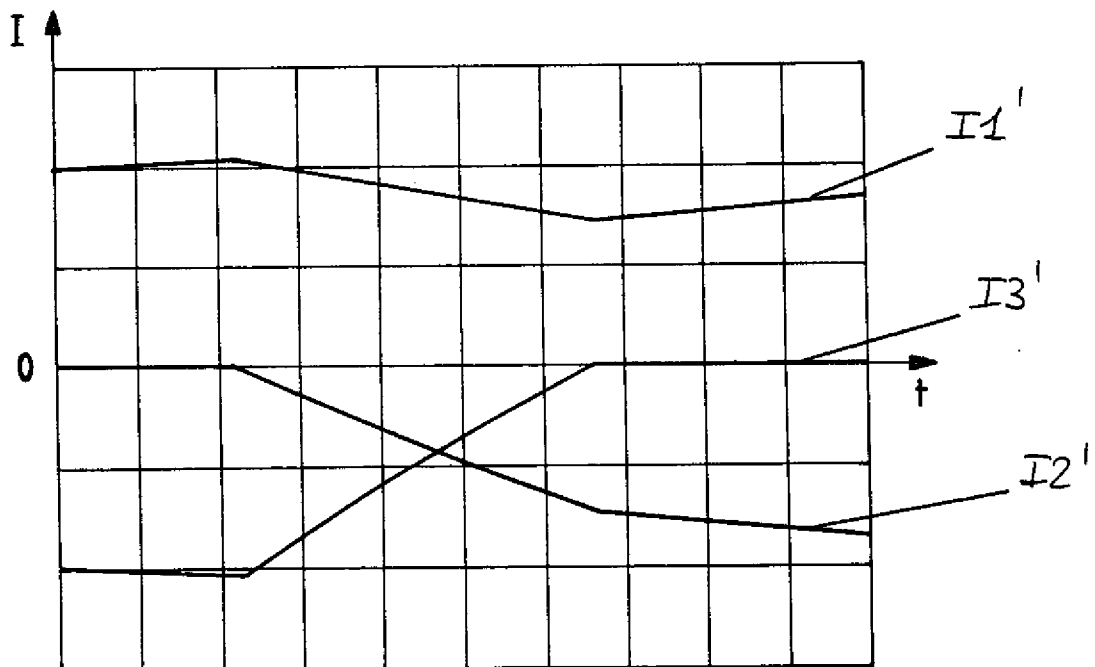


Fig. 8

p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.

G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni

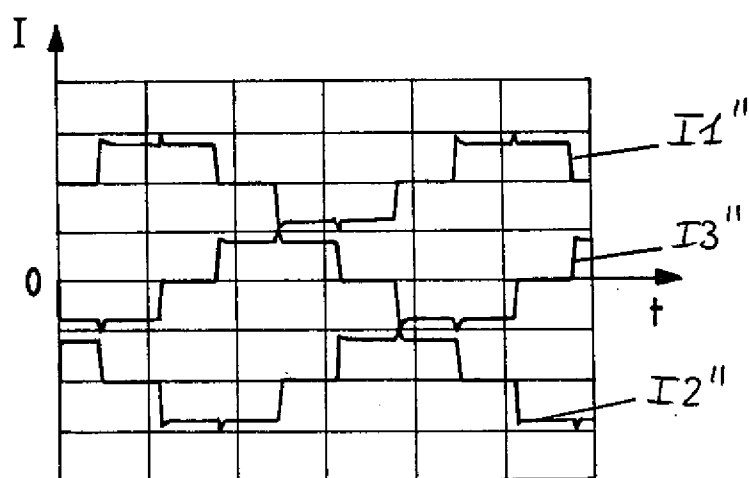
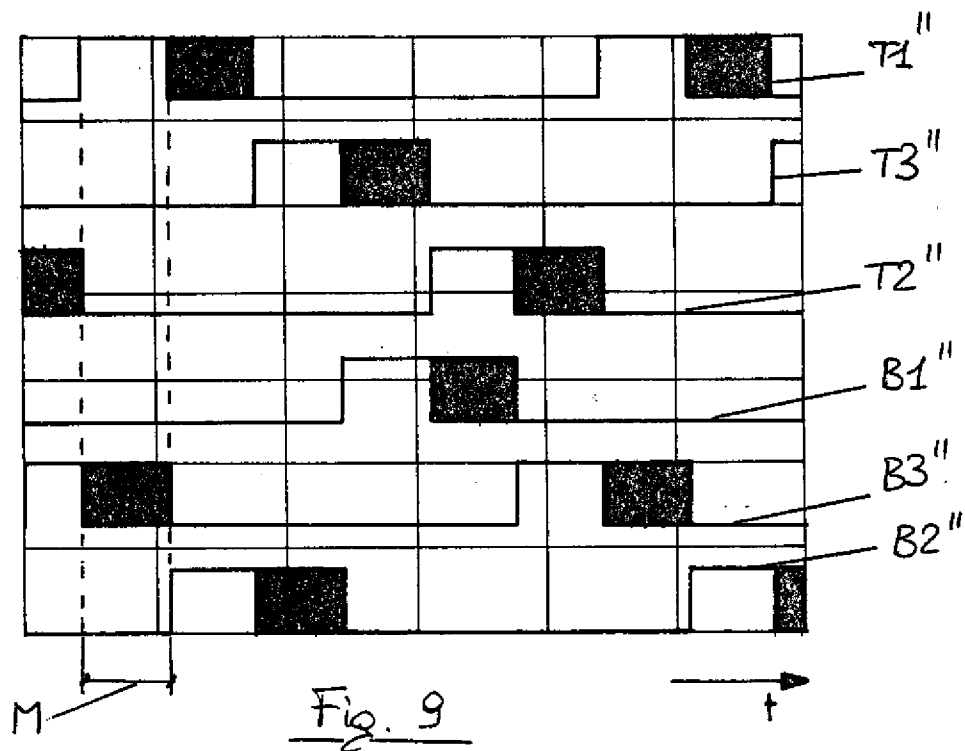
A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti

M. Giuli - A. Zappella

(firma)

*[Signature]*  
(per sè e per gli altri)





p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.  
G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni  
A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti  
M. Giuli - A. Zappella

(firma)

*[Signature]*  
(per sé e per gli altri)



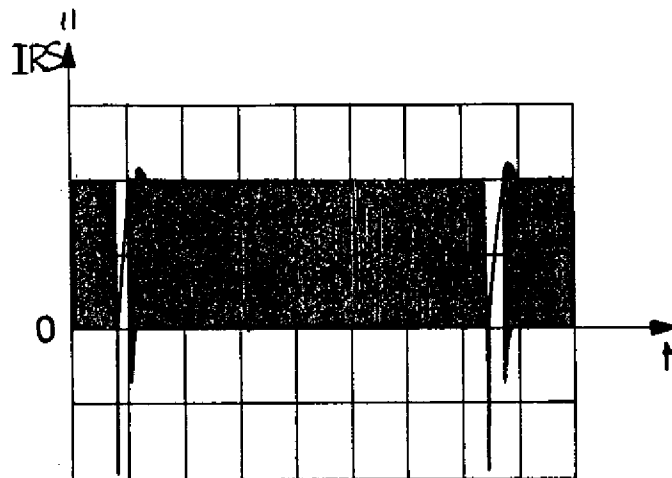


Fig. 11

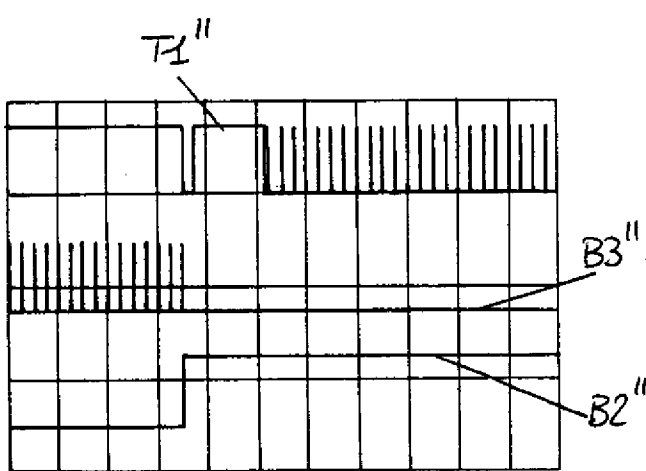


Fig. 12

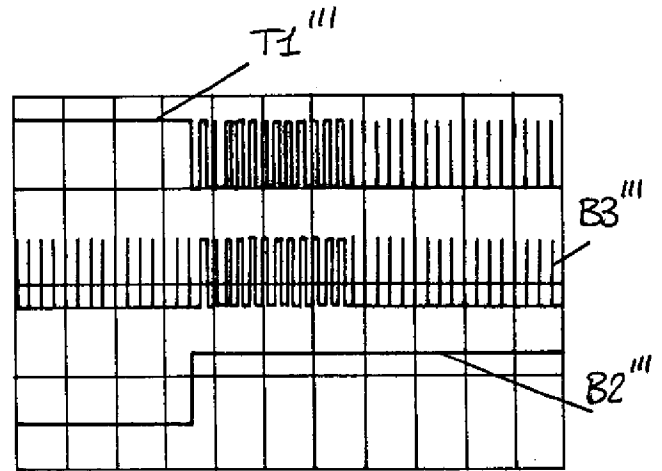


Fig. 14

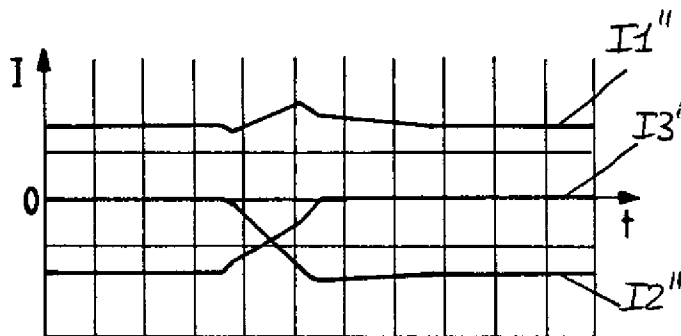


Fig. 13

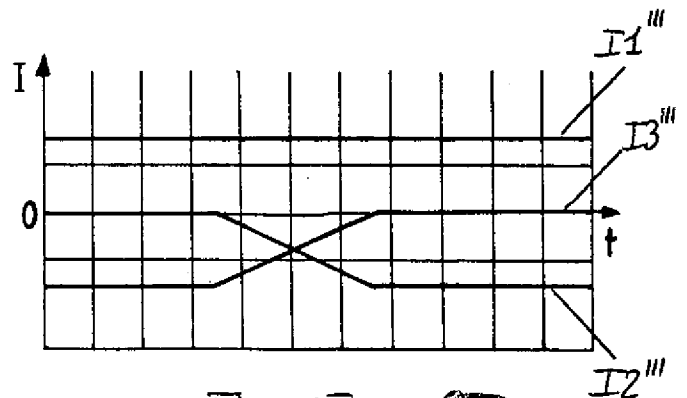


Fig. 15

MANDATARI NOMINATI.  
 G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni  
 A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti  
 M. Giuli - A. Zappella  
 (firma) *G. Zanardo*  
 (per sè e per gli altri)  
 p.i. BITRON S.p.A.



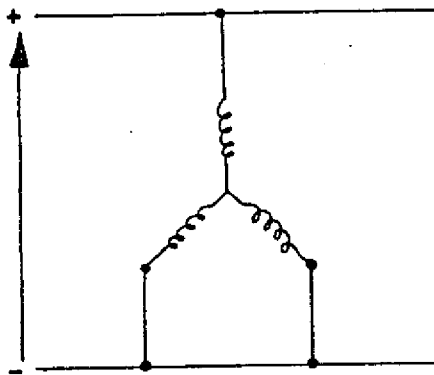


Fig. 16

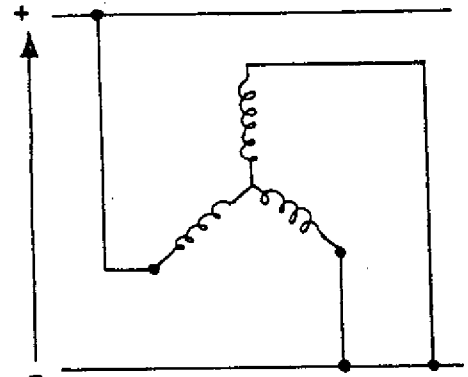


Fig. 17

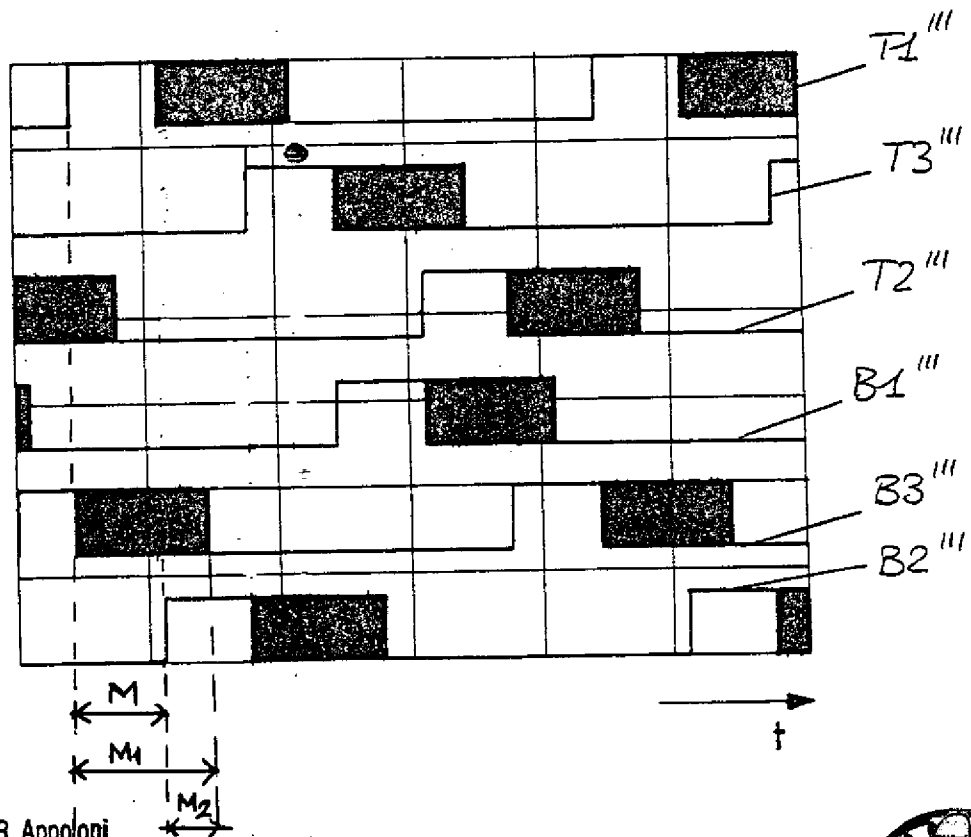


Fig. 18

p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.

G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni  
A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti  
M. Giuli - A. Zappella

(firma)

*[Handwritten signature]*  
(per se e per gli altri)



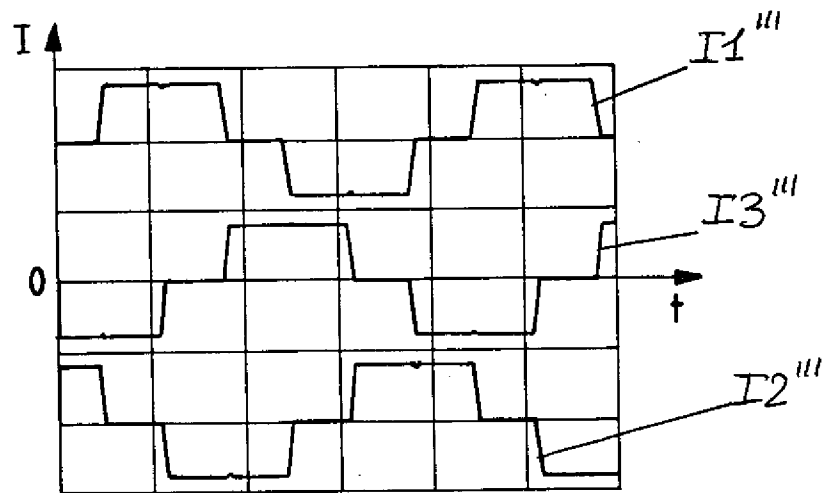


Fig. 19

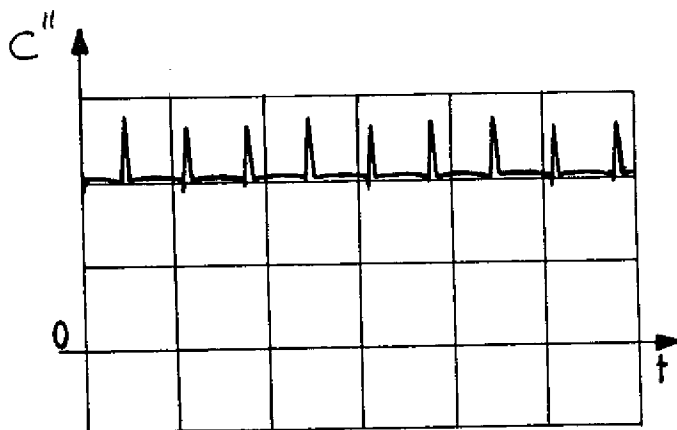


Fig. 20

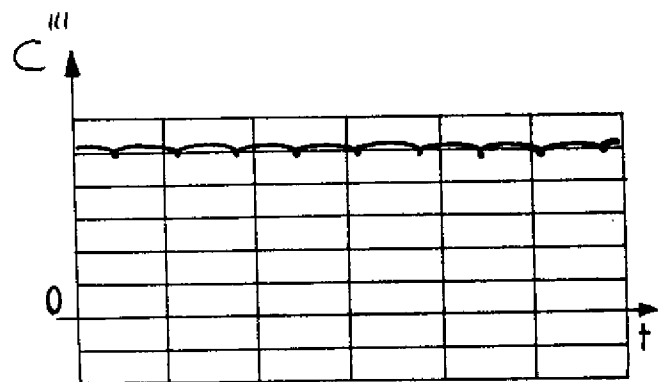


Fig. 21

p.i. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI.

G. Zanardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni

A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti

M. Giuli - A. Zappella

(firma)

(per sé e per gli altri)

