



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102009901703362
Data Deposito	13/02/2009
Data Pubblicazione	13/08/2010

Classifiche IPC

Titolo

MACCHINA ELETTRICA CON SINGOLO STATORE E DUE ROTORI TRA LORO INDIPENDENTI E VEICOLO STRADALE PROVVISIO DI TALE MACCHINA ELETTRICA
--

D E S C R I Z I O N E

del brevetto per Invenzione Industriale dal titolo:

"MACCHINA ELETTRICA CON SINGOLO STATORE E DUE ROTORI TRA LORO INDIPENDENTI E VEICOLO STRADALE PROVVISIO DI TALE MACCHINA ELETTRICA"

di MAGNETI MARELLI S.P.A.,

di nazionalità italiana,

con sede: VIALE ALDO BORLETTI, 61/63

CORBETTA (MI)

Inventori: SERRA Giovanni, TANI Angelo, ZARRI Luca, RAIMONDI Marco, GRECO Marco, COMINETTI Paolo.

*** **

SETTORE DELLA TECNICA

La presente invenzione è relativa ad una macchina elettrica con singolo statore e due rotori tra loro indipendenti ed è inoltre relativa ad un veicolo stradale provvisto di tale macchina elettrica.

La presente invenzione trova vantaggiosa applicazione in un veicolo stradale a cui la presente invenzione fa esplicito riferimento senza per questo perdere di generalità.

ARTE ANTERIORE

Nei veicoli stradali sta prendendo sempre più piede la trazione elettrica in abbinamento alla tradizionale

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

trazione termica per realizzare una trazione ibrida.

In un primo schema di trazione ibrida, una macchina elettrica viene meccanicamente collegata ad una trasmissione interposta tra il motore termico e le ruote motrici; in questo modo la macchina elettrica non ha bisogno di propri elementi di trasmissione (cioè di un proprio differenziale e di propri semiassi), ma condivide gli elementi di trasmissione del motore termico. Tuttavia, tale scelta costruttiva pone seri problemi di gestione degli ingombri, in quanto non è sempre semplice trovare in prossimità della trasmissione del motore termico lo spazio necessario ad alloggiare la macchina elettrica ed il relativo convertitore elettronico di potenza (che deve possibilmente venire disposto in prossimità della macchina elettrica per contenere la lunghezza dei cavi elettrici di collegamento e quindi le perdite di potenza per effetto Joule e la caduta di tensione ed i disturbi elettromagnetici che si verificano nei cavi elettrici di collegamento). Inoltre, se la trasmissione del motore termico trasmette originariamente la coppia motrice su di un solo asse del veicolo (cioè in caso di trazione unicamente anteriore o posteriore), anche l'aggiunta della macchina elettrica non modifica tale situazione.

Per risolvere gli inconvenienti sopra descritti è stato proposto un secondo schema di trazione ibrida, in cui

è prevista una trasmissione del motore termico che trasmette la coppia motrice del motore termico ad un asse del veicolo (anteriore o posteriore) ed è prevista una ulteriore trasmissione della macchina elettrica che è completamente indipendente dalla trasmissione del motore termico e trasmette la coppia motrice del motore elettrico all'altro asse del veicolo (posteriore o anteriore). La trasmissione della macchina elettrica è più semplice della trasmissione del motore termico in quanto non prevede l'assieme frizione/cambio e comprende solo un differenziale da cui partono una coppia di semiassi solidali alle ruote motrici motorizzate dalla macchina elettrica. Tale soluzione presenta il vantaggio di separare la trasmissione del motore termico dalla trasmissione della macchina elettrica e quindi di permettere una maggiore flessibilità nel piazzamento della macchina elettrica; inoltre, tale soluzione presenta il vantaggio di essere una trasmissione integrale inseribile molto ben controllabile che fornisce, quando necessario, una elevata motricità (cioè una elevata capacità di trasmettere a terra la coppia motrice).

Per eliminare la necessità del differenziale nella trasmissione della macchina elettrica e per aumentare le capacità di controllo del veicolo è stata proposta una ulteriore variante, in cui sono previste due macchine elettriche tra loro identiche, ciascuna delle quali

trasmette direttamente il moto ad una corrispondente ruota motrice ed è preferibilmente disposta coassiale alla ruota motrice stessa. In questa variante pilotando in modo differenziato le due macchine elettriche è possibile differenziare la coppia motrice applicata alle due ruote motorizzate elettricamente, cioè è possibile realizzare un controllo "torque vectoring" che prevede di applicare una coppia motrice non simmetrica (ovviamente solo in condizioni particolari) per aumentare la trazione e la stabilità del veicolo stradale. A titolo di esempio, durante la percorrenza di una curva la ruota interna è più caricata della ruota esterna e quindi è in grado di scaricare al suolo una coppia motrice superiore rispetto alla ruota esterna. Tuttavia, l'utilizzo di due macchine elettriche indipendenti che devono venire disposte coassialmente ad uno stesso asse pone grossi problemi di ingombri lungo tale asse (cioè di ingombri trasversali nell'ambito del veicolo). Inoltre, l'utilizzo di due macchine elettriche indipendenti richiede la presenza di due convertitori elettronici di potenza indipendenti con un aumento degli ingombri e con una complicazione nei collegamenti elettrici dei convertitori elettronici di potenza al sistema di accumulo di energia elettrica e nel raffreddamento dei convertitori elettronici di potenza (i convertitori elettronici di potenza sono statici e quindi

sono in grado di raffreddarsi per autoventilazione solo in modo limitato e necessitano di un sistema di raffreddamento esterno).

DESCRIZIONE DELLA INVENZIONE

Scopo della presente invenzione è di fornire una macchina elettrica con singolo statore e due rotori tra loro indipendenti ed un veicolo stradale provvisto di tale macchina elettrica, i quali macchina elettrica e veicolo stradale siano privi degli inconvenienti sopra descritti e siano nel contempo di facile ed economica realizzazione.

Secondo la presente invenzione vengono forniti una macchina elettrica con singolo statore e due rotori tra loro indipendenti ed un veicolo stradale provvisto di tale macchina elettrica secondo quanto rivendicato dalle rivendicazioni allegate.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

La presente invenzione verrà ora descritta con riferimento ai disegni annessi, che ne illustrano alcuni esempi di attuazione non limitativi, in cui:

- la figura 1 è una vista schematica, in pianta e con parti asportate per chiarezza di un veicolo stradale provvisto di una macchina elettrica con singolo statore e due rotori tra loro indipendenti realizzata

in accordo con la presente invenzione;

- la figura 2 è una vista schematica, parzialmente in sezione e con parti asportate per chiarezza, della macchina elettrica della figura 1;
- la figura 3 è una sezione schematica secondo la linea III-III e con parti asportate per chiarezza di un primo rotore della macchina elettrica della figura 1;
- la figura 4 è una sezione schematica secondo la linea IV-IV e con parti asportate per chiarezza di un secondo rotore della macchina elettrica della figura 1;
- la figura 5 è una sezione schematica secondo la linea V-V e con parti asportate per chiarezza dell'unico statore della macchina elettrica della figura 1;
- le figure 6 e 7 sono viste schematiche, parzialmente in sezione e con parti asportate di due varianti costruttive della macchina elettrica della figura 1;
- le figure 8, 9 e 10 sono dei grafici che illustrano l'evoluzione temporale di sistemi pentafase di correnti elettriche che circolano in uso nell'avvolgimento statorico della macchina elettrica della figura 1;
- la figura 11 mostra gli sfasamenti tra le fasi di due sistemi pentafase di correnti elettriche sinusoidali che circolano in uso nell'avvolgimento statorico della

macchina elettrica della figura 1; e

- la figura 12 è uno schema a blocchi di una logica di controllo della macchina elettrica della figura 1.

FORME DI ATTUAZIONE PREFERITE DELL'INVENZIONE

Nella figura 1, con il numero 1 è indicato nel suo complesso un veicolo (in particolare una automobile) provvisto di due ruote 2 anteriori e di due ruote 3 posteriori, che ricevono la coppia motrice da un sistema 4 di motopropulsione ibrido.

Il sistema 4 di motopropulsione ibrido comprende un motore 5 termico a combustione interna, il quale è disposto in posizione anteriore ed è provvisto di un albero 6 motore, ed una trasmissione 7, la quale trasmette la coppia motrice generata dal motore 5 a combustione interna verso le ruote 3 posteriori motrici. La trasmissione 7 comprende un albero 8 di trasmissione che da un lato è angolarmente solidale all'albero 6 motore e dall'altro lato è meccanicamente collegato ad un cambio 9, il quale è disposto in posizione posteriore e trasmette il moto alle ruote 3 posteriori motrici mediante due semiassi 10 che ricevono il moto da un differenziale 11.

Inoltre, il sistema 4 di motopropulsione ibrido comprende una macchina 12 elettrica reversibile (cioè che può funzionare sia come motore elettrico assorbendo energia

elettrica e generando un coppia meccanica motrice, sia come generatore elettrico assorbendo energia meccanica e generando energia elettrica) che è disposta in posizione anteriore ed è meccanicamente collegata alle ruote 2 anteriori motrici mediante una coppia di semiassi 13. La macchina 12 elettrica reversibile è pilotata da un convertitore 14 elettronico di potenza collegato ad un sistema 15 di accumulo, il quale è atto ad immagazzinare energia elettrica e comprende una serie di dispositivi di accumulo comprendenti a loro volta batterie chimiche e/o supercondensatori.

Secondo quanto illustrato nella figura 2, la macchina 12 elettrica comprende due alberi 13, i quali costituiscono anche i semiassi delle ruote 2 anteriori motrici, sono tra loro coassiali ed indipendenti e sono montati girevoli attorno ad uno stesso asse 16 di rotazione che è coassiale all'asse di rotazione delle ruote 2 anteriori. La macchina 12 elettrica comprende due rotorì 17 (rispettivamente 17a e 17b), i quali sono tra loro meccanicamente indipendenti e sono calettati agli alberi 13, ed un unico statore 18 di forma tubolare cilindrica disposto attorno ai due rotorì 17 per racchiudere al proprio interno i due rotorì 17 stessi (di conseguenza i due rotorì 17 sono magneticamente accoppiati allo statore 18). Lo statore 18 comprende un nucleo 19 ferromagnetico di forma tubolare cilindrica ed un

unico avvolgimento 20 statorico (schematicamente illustrato nella figura 2) pentafase, i cui conduttori attivi si estendono parallelamente all'asse 16 di rotazione e sono disposti attorno all'asse 16 di rotazione.

Secondo quanto illustrato nella figura 3, il rotore 17a è a magneti permanenti a otto poli (quattro coppie di poli) e comprende una armatura 21a magnetica di forma cilindrica e calettata all'albero 13a ed otto magneti 22a permanenti, i quali sono uniformemente distribuiti attorno all'asse 16 di rotazione e sporgono a sbalzo dall'armatura 21a magnetica. In modo simile, secondo quanto illustrato nella figura 4 il rotore 17b è a magneti permanenti a sei poli (cioè tre coppie di poli) e comprende una armatura 21b magnetica di forma cilindrica e calettata all'albero 13b e sei magneti 22b permanenti, i quali sono uniformemente distribuiti attorno all'asse 16 di rotazione e sporgono a sbalzo dall'armatura 21b magnetica.

Secondo una alternativa forma di attuazione, i rotori 17 sono sempre a magneti permanenti, ma i magneti permanenti invece di essere esterni ed a sbalzo come illustrato nelle figure 3 e 4 sono interni, ossia "annegati" nelle armature 21 magnetiche dei rotori 17 stessi. Secondo una ulteriore forma di attuazione, i rotori 17 sono a magneti permanenti e sono conformati come strutture a riluttanza con anisotropia magnetica dei rotori

17 stessi.

Secondo una preferita forma di attuazione illustrata nella figura 2, è previsto un elemento 23 di separazione, il quale presenta una forma piatta circolare, è disposto tra i due rotori 17, divide lo statore 18 in due parti, è realizzato in materiale amagnetico (ad esempio alluminio), e supporta due cuscinetti 24, ciascuno dei quali è accoppiato ad un rispettivo albero 13. Oltre che a supportare meccanicamente i cuscinetti 24, l'elemento 23 di separazione permette di ottenere una certa separazione tra i flussi magnetici dei due rotori 17 creando tra i due rotori 17 stessi un traferro; in questo modo, si riducono le indesiderate interazioni del flusso magnetico generato da un rotore 17 sull'altro rotore 17.

Secondo quanto illustrato nella figura 5, lo statore 18 comprende il nucleo 19 ferromagnetico di forma tubolare cilindrica l'unico avvolgimento 20 statorico pentafase, i cui conduttori attivi si estendono parallelamente all'asse 16 di rotazione e sono disposti attorno all'asse 16 di rotazione. L'avvolgimento 20 statorico comprende una pluralità di bobine, le quali sono disposte in corrispondenti cave 25 ricavate attraverso il nucleo 19 ferromagnetico e sono tra loro collegate in modo da definire cinque fasi distinte. Ciascuna bobina comprende due lati 26 attivi, i quali sono disposti in due cave 25

diverse ed in ciascuna cava 25 sono disposti tra loro sovrapposti due lati 26 attivi di due bobine diverse (cioè l'avvolgimento 20 statorico è a doppio strato). L'avvolgimento 20 statorico illustrato nella figura 5 è pentafase, a doppio strato, con 15 cave e con bobine aventi passo 1-3; i numeri riportati nella figura 5 in corrispondenza dei vari lati attivi delle bobine indicano la fase che occupa lo strato corrispondente mentre il segno indica il verso di percorrenza.

Nella forma di attuazione illustrata nella figura 2, i due rotorì 17 sono disposti uno di fianco all'altro. Invece, nella variante illustrata nella figura 6, i due rotorì 17 sono disposti uno all'interno dell'altro; in particolare, nella variante illustrata nella figura 6 il rotore 17a è conformato a tazza, è disposto attorno allo statore 18, e contiene al suo interno lo statore 18 stesso, ed il rotore 17b è disposto all'interno dello statore 18 e quindi anche all'interno del rotore 17a. Nella forma di attuazione illustrata nella figura 7, lo statore 18 è disposto in mezzo ai due rotorì 17 e gli avvolgimenti 20 statorici sono disposti perpendicolarmente all'asse 16 di rotazione.

L'avvolgimento 20 statorico pentafase è realizzato in modo tale che quando viene percorso da un primo sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali genera un

primo campo magnetico MF_a rotante che presenta una quarta armonica molto importante (cioè di intensità elevata) ed una terza armonica trascurabile (cioè di intensità ridotta); in altre parole, quando l'avvolgimento 20 statorico pentafase è percorso dal primo sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali genera il primo campo MF_a magnetico rotante in cui l'armonica di ampiezza maggiore è la quarta armonica mentre la terza armonica è trascurabile. Inoltre, l'avvolgimento 20 statorico pentafase è realizzato in modo tale che quando viene percorso da un secondo sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali genera un secondo campo MF_b magnetico rotante che presenta una terza armonica molto importante (cioè di intensità elevata) ed una quarta armonica trascurabile (cioè di intensità ridotta); in altre parole, quando l'avvolgimento 20 statorico pentafase è percorso dal secondo sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali genera il secondo campo MF_b magnetico rotante in cui l'armonica di ampiezza maggiore è la terza armonica mentre la quarta armonica è trascurabile.

Il primo campo MF_a magnetico rotante avendo una quarta armonica molto importante (cioè di intensità elevata) ed una terza armonica trascurabile porta in rotazione il rotore 17a che presenta otto magneti 22a permanenti (cioè quattro coppie di poli), ma non ha quasi alcun effetto sul

rotore 17b che presenta sei magneti 22b permanenti (cioè tre coppie di poli); analogamente, il secondo campo MF_b magnetico rotante avendo una terza armonica molto importante (cioè di intensità elevata) ed una quarta armonica trascurabile porta in rotazione il rotore 17b che presenta sei magneti 22b permanenti, ma non ha quasi alcun effetto sul rotore 17a che presenta otto magneti 22a permanenti. In altre parole, il rotore 17a che presenta otto magneti 22a permanenti viene portato in rotazione dalla quarta armonica di un campo magnetico rotante (cioè la quarta armonica di un campo magnetico rotante genera sul rotore 17a una coppia motrice non nulla), ma non viene portato in rotazione dalla terza armonica di un campo magnetico rotante (cioè la terza armonica di un campo magnetico rotante genera sul rotore 17a una coppia motrice mediamente nulla); analogamente, il rotore 17b che presenta sei magneti 22b permanenti viene portato in rotazione dalla terza armonica di un campo magnetico rotante (cioè la terza armonica di un campo magnetico rotante genera sul rotore 17b una coppia motrice non nulla), ma non viene portato in rotazione dalla quarta armonica di un campo magnetico rotante (cioè la quarta armonica di un campo magnetico rotante genera sul rotore 17b una coppia motrice mediamente nulla).

Il convertitore 14 elettronico di potenza genera un

sistema pentafase complessivo di correnti I_{TOT} elettriche che circola attraverso l'avvolgimento 20 statorico ed è costituita dall'unione di un sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali di frequenza f_a che genera un campo magnetico MF_a rotante ad una velocità ω_a di rotazione (direttamente proporzionale alla frequenza f_a) che presenta una quarta armonica molto importante ed una terza armonica trascurabile e di un sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali di frequenza f_b che genera un campo magnetico MF_b rotante ad una velocità ω_b di rotazione (direttamente proporzionale alla frequenza f_b) che presenta una terza armonica molto importante ed una quarta armonica trascurabile. Il sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali viene generato unicamente in funzione delle esigenze di controllo del rotore 17a, mentre il sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali viene generato unicamente in funzione delle esigenze di controllo del rotore 17b; il sistema pentafase complessivo di correnti I_{TOT} elettriche che viene fatto circolare attraverso l'avvolgimento 20 statorico è il risultato della somma algebrica dei sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali.

E' importante osservare che essendo il sistema pentafase di correnti I_a/I_b elettriche sinusoidali generato unicamente in funzione delle esigenze di controllo del

rotore 17a/17b, la frequenza del sistema pentafase di correnti I_a/I_b elettriche sinusoidali dipende unicamente dalla velocità ω_a/ω_b di rotazione del rotore 17a/17b; in altre parole, la frequenza del sistema pentafase di correnti I_a/I_b elettriche sinusoidali è direttamente proporzionale alla velocità ω_a/ω_b di rotazione del rotore 17a/17b ed al numero $N1/N2$ di coppie di poli del rotore 17a/17b. Di conseguenza, generalmente le frequenze dei due sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali sono diverse e sono uguali solo nel caso particolare in cui i due rotor 17a e 17b ruotino con velocità ω_a e ω_b di rotazione che presentano un rapporto pari al rapporto dei rispettivi numeri $N1$ e $N2$ di coppie di poli (cioè con velocità ω_a e ω_b di rotazione inversamente proporzionali ai numeri $N1$ e $N2$ di coppie di poli).

Per riassumere e generalizzare quanto sopra descritto, il rotore 17a è a magneti permanenti e presenta un numero $N1$ di coppie di poli (pari a quattro nella forma di attuazione illustrata), il rotore 17b è a magneti permanenti e presenta un numero $N2$ di coppie di poli (pari a tre nella forma di attuazione illustrata) diverso dal numero $N1$ di coppie di poli e l'avvolgimento 20 statorico presenta un numero di fasi dispari ed almeno pari a cinque. Quando l'avvolgimento 20 statorico viene percorso da un sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali

genera un campo MF_a magnetico rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al numero $N1$ di coppie di poli ed armoniche trascurabili di ordine pari al numero $N2$ di coppie di poli o ad un suo multiplo, e quando viene percorso da un sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali diverso dal sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali genera un campo MF_b magnetico rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al numero $N2$ di coppie di poli ed armoniche trascurabili di ordine pari al numero $N1$ di coppie di poli o ad un suo multiplo.

Secondo una preferita forma di attuazione, la differenza tra i numeri $N1$ ed $N2$ di coppie di poli è intero e pari a uno (più in generale non è mai superiore a otto-dieci); questa caratteristica permette di ottimizzare a parità di pesi/ingombri le prestazioni della macchina 12 elettrica.

I sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali si differenziano tra loro a parte per la diversa frequenza f_a ed f_b (che dipendente unicamente dalle velocità ω_a e ω_b di rotazione dei rotori 17a e 17b) per gli sfasamenti tra le varie fasi, cioè per l'angolo di ritardo esistente tra la corrente di una fase e la corrente della fase successiva. Come è illustrato nella figura 11, il sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali

presenta un angolo di ritardo di 72° , cioè è un sistema cosiddetto di ordine 1; invece, il sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali presenta un angolo di ritardo di 216° , cioè è un sistema cosiddetto di ordine 3. L'ordine di un sistema pentafase di correnti elettriche sinusoidali è definito dalla seguente equazione:

$$\text{Ordine} = \text{angolo di ritardo} / (360^\circ / \text{numero di fasi})$$

Grazie al fatto che i due sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali presentano angoli di ritardo diversi, circolando attraverso lo stesso avvolgimento 20 statorico generano campi MF_a e MF_b magnetici rotanti tra loro diversi ed in particolare aventi un diverso contenuto armonico. Ovviamente, le differenze negli angoli di ritardo dei due sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali devono venire determinati in funzione delle caratteristiche dell'avvolgimento 20 statorico per ottenere i due campi MF_a e MF_b magnetici rotanti desiderati.

Relativamente alla scelta del tipo di avvolgimento 20 statorico, il criterio da utilizzare è la ricerca di un avvolgimento che quando viene percorso da una corrente sinusoidale (cioè da una singola fase di un sistema multifase) genera un campo magnetico stazionario avente due

armoniche dominanti, le quali devono essere molto più importanti delle altre armoniche, devono essere all'incirca simili (cioè non devono avere tra loro differenze di intensità troppo rilevanti), e devono essere tra loro vicine.

Il fatto che il campo magnetico stazionario generato da una corrente sinusoidale che attraversa l'avvolgimento 20 statorico abbia due armoniche dominanti è legato al fatto che è necessario generare due campi MF_a e MF_b magnetici rotanti tra loro diversi ed in particolare aventi un diverso contenuto armonico.

Il fatto che il campo magnetico stazionario generato da una corrente sinusoidale che attraversa l'avvolgimento 20 statorico deve avere due armoniche dominanti all'incirca simili è legato al fatto che i due campi MF_a e MF_b magnetici rotanti devono avere intensità simile (a parità di intensità della corrente) per non determinare squilibri troppo rilevanti nelle coppie motrici generate nei due rotor 17a e 17b; ovviamente la coppia motrice che viene generata in un rotore 17a/17b dipende dall'intensità del campo MF_a/MF_b magnetico rotante e dal numero di coppie $N1/N2$ di poli, quindi una differenza nelle intensità dei campi MF_a e MF_b magnetici rotanti può venire compensata da una corrispondente differenza nel numero di coppie $N1$ e $N2$ di poli. Inoltre, una piccola differenza residua nelle

intensità dei campi MF_a e MF_b magnetici rotanti può venire compensata da una corrispondente differenza nella dimensione assiale dei due rotori 17a e 17b (cioè un rotore 17a/17b è più lungo dell'altro rotore 17b/17a). E' importante puntualizzare che agendo opportunamente sulle intensità delle correnti elettriche è sempre possibile ottenere le desiderate intensità dei campi MF_a e MF_b magnetici rotanti, ma è opportuno che a parità di intensità delle correnti elettriche le intensità dei campi MF_a e MF_b magnetici rotanti siano il più possibile simili per garantire una buona simmetria all'assieme e quindi evitare dissimmetrie costruttive che complicano la realizzazione ed aumentano anche il costo complessivo.

Il fatto che il campo magnetico stazionario generato da una corrente sinusoidale che attraversa l'avvolgimento 20 statorico deve avere due armoniche dominanti tra loro vicine è legato al fatto che per motivi costruttivi i numeri di coppie N1 e N2 di poli dei due rotori 17a e 17b non devono essere tra loro troppo diversi.

Dagli studi effettuati dagli inventori, l'avvolgimento 20 statorico deve essere necessariamente di tipo frazionario, cioè deve presentare un numero di cave per polo e per fase non intero (a titolo di esempio l'avvolgimento 20 statorico illustrato nella figura 5 presenta 0,5 cave per polo e per fase rispetto al rotore

17b avente 6 poli); infatti, in base a quanto scoperto fino ad oggi solo gli avvolgimenti 20 statorici frazionari sono adatti al sopra descritto controllo indipendente dei due rotori 17. Per determinare gli avvolgimenti 20 statorici adatti al sopra descritto controllo indipendente dei due rotori 17 (ovviamente oltre all'avvolgimento 20 statorico sopra descritto) è necessario procedere per via sperimentale provando tutti gli avvolgimenti 20 statorici frazionari possibili. Le modalità di realizzazione di un avvolgimento 20 statorico frazionario pentafase sono note in letteratura e sono anche direttamente derivabili dalle modalità di realizzazione di un avvolgimento 20 statorico frazionario trifase (a titolo di esempio descritte nel libro "Di Pierro, Costruzioni Elettromeccaniche, SIDEREA, Roma"). In altre parole, procedendo in modo sperimentale si devono individuare le combinazioni di numero di cave e numero di poli adatti al sopra descritto controllo indipendente dei due rotori 17.

Nella figura 8 è illustrato un esempio del sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali per il controllo del solo rotore 17a, nella figura 9 è illustrato un esempio del sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali per il controllo del solo rotore 17b, e nella figura 10 è illustrato un esempio del sistema pentafase complessivo di correnti I_{TOT} elettriche che percorre

l'avvolgimento 20 statorico nel caso in cui i due rotori 17 ruotino alla stessa velocità ω angolare.

Un esempio di uno schema di controllo della macchina 12 elettrica è schematizzato nella figura 12. E' importante sottolineare che la macchina 12 elettrica è controllata in coppia, in quanto la velocità di rotazione dei rotori 17 è imposta dalla velocità di avanzamento del veicolo 1. In altre parole, i rotori 17 sono angolarmente solidali alle ruote 2 anteriori, di conseguenza la velocità di rotazione dei rotori 17 è imposta dalla velocità di avanzamento del veicolo 1 (in assenza di pattinamento delle ruote 2 anteriori che è un evento da evitare in ogni modo in quanto riduce la motricità e la stabilità del veicolo 1); quindi risulta conveniente controllare la coppia motrice/frenante generata/assorbita dai rotori 17.

Il convertitore 14 elettronico di potenza viene pilotato da una centralina 27 di controllo comprendente un blocco 28a/28b di riferimento che genera una coppia T_{REFa}/T_{REFb} di riferimento per il rotore 17a/17b che viene inseguita mediante un controllo ad anello chiuso (cioè a retroazione). La coppia T_a/T_b effettiva all'albero 13a/13b del rotore 17a/17b viene stimata da un blocco 29a/29b stimatore e viene confrontata con la coppia T_{REFa}/T_{REFb} di riferimento per determinare un errore $\varepsilon_a/\varepsilon_b$ di coppia che viene elaborato da un regolatore PID 30a/30b in modo da

generare il valore desiderato del sistema pentafase di correnti I_a/I_b elettriche sinusoidali. I due sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali vengono quindi sommate per determinare il valore desiderato del sistema pentafase complessivo di correnti I_{TOT} elettriche che circola attraverso l'avvolgimento 20 statorico; il sistema pentafase complessivo di correnti I_{TOT} elettriche circolando attraverso l'avvolgimento 20 statorico genera un campo magnetico MF_a rotante che presenta una quarta armonica molto importante ed una terza armonica trascurabile per effetto della componente costituita dal sistema pentafase di correnti I_a elettriche sinusoidali e genera un campo magnetico MF_b rotante che presenta una terza armonica molto importante ed una quarta armonica trascurabile per effetto della componente costituita dal sistema pentafase di correnti I_b elettriche sinusoidali.

Come detto in precedenza, il campo magnetico MF_a/MF_b rotante genera un coppia media non nulla solo sul rotore 17a/17b e quindi il sistema pentafase di correnti I_a/I_b elettriche sinusoidali ha effetto solo sul corrispondente rotore 17a/17b. In questo modo, da un punto di vista del controllo la macchina 12 elettrica pur avendo un unico statore 18 ed un unico avvolgimento 20 statorico viene vista a tutti gli effetti come due macchine elettriche

distinte ed indipendenti.

Nella forma di attuazione sopra descritta è previsto l'utilizzo di sistemi pentafase di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali; ovviamente secondo diverse forme di attuazione possono venire utilizzati sistemi di correnti I_a e I_b elettriche sinusoidali con numero di fasi superiore a cinque, ad esempio con sette o nove fasi.

Nella forma di attuazione sopra descritta è prevista la presenza di due rotori 17a e 17b; ovviamente secondo diverse forme di attuazione possono venire utilizzati più di due rotori 17 aventi numero di coppie di poli differenziati.

La macchina 12 elettrica può venire utilizzata come motore elettrico (assorbendo energia elettrica e generando un coppia meccanica motrice) per generare un coppia motrice che può aggiungersi o sostituire la coppia motrice generata dal motore 5 termico. Inoltre, la macchina 12 elettrica può venire utilizzata come generatore elettrico (assorbendo energia meccanica e generando energia elettrica) per generare un coppia frenante che durante le fasi di rallentamento del veicolo 1 permette di recuperare parte dell'energia cinetica posseduta dal veicolo 1 stesso (frenata rigenerativa). In particolare, la macchina 12 elettrica può venire utilizzata come motore elettrico per fare diventare motrici anche le ruote 2 anteriori in modo

da ottenere una trazione integrale (inseribile) per aumentare la motricità (cioè la capacità di trasmettere a terra la coppia motrice) in condizioni di scarsa aderenza.

Inoltre, avendo un controllo indipendente delle coppie motrici/frenanti applicate alle ruote 2 anteriori la macchina 12 elettrica permette di realizzare un controllo "torque vectoring" che prevede di applicare una coppia motrice/frenante non simmetrica per aumentare la trazione e la stabilità del veicolo 1. A titolo di esempio, durante la percorrenza di una curva la ruota interna è più caricata della ruota esterna e quindi è in grado di scaricare al suolo una coppia motrice superiore rispetto alla ruota esterna.

La macchina 12 elettrica sopra descritta presenta numerosi vantaggi. In primo luogo, la macchina 12 elettrica sopra descritta è di semplice ed economica realizzazione, in quanto è strutturalmente simile ad una macchina elettrica convenzionale e quindi non richiede apparecchiature di lavorazione particolari e dedicate per la sua realizzazione. Rispetto alla soluzione con due macchine elettriche completamente separate ed indipendenti la macchina 12 elettrica sopra descritta richiede un unico convertitore 14 elettronico di potenza che alimenta un unico avvolgimento 20 statorico con un evidente risparmio di costo, peso, e dimensioni del convertitore 14

elettronico di potenza stesso; inoltre, un unico convertitore 14 elettronico di potenza collegato ad un unico avvolgimento 20 statorico semplifica e riduce la lunghezza complessiva dei cablaggi elettrici (anche con il sistema 15 di accumulo) e semplifica il raffreddamento del convertitore 14 elettronico di potenza (che è statico e quindi è in grado di raffreddarsi per autoventilazione solo in modo molto limitato e necessita di un sistema di raffreddamento esterno).

Rispetto alla soluzione con due macchine elettriche completamente separate la macchina 12 elettrica sopra descritta presenta un ingombro assiale ridotto, in quanto viene dimezzato il numero delle testate degli avvolgimenti statorici e degli scudi; in altre parole, con due macchine elettriche completamente separate sono presenti due avvolgimenti statorici separati e quindi sono necessarie quattro testate e quattro scudi (due per ciascun statore), mentre nella macchina 12 elettrica sopra descritta è presente un unico avvolgimento 20 statorico e quindi sono necessarie solo due testate e due scudi. Grazie, al suo ridotto ingombro assiale, la macchina 12 elettrica sopra descritta è particolarmente adatta a venire disposta in un veicolo per agire su due ruote di uno stesso assale.

Pur trovando un impiego ottimale nell'autotrazione, la macchina 12 elettrica sopra descritta può trovare

applicazione anche in altri campi in cui è necessario controllare in modo indipendente almeno due assi. Ovviamente, la macchina 12 elettrica potrebbe comprendere anche più di due rotori 17.

R I V E N D I C A Z I O N I

1) Macchina (12) elettrica comprendente:

uno statore (18) provvisto di un unico avvolgimento (20) statorico;

almeno due alberi (13a, 13b), i quali sono tra loro indipendenti e montati girevoli;

almeno due rotorì (17a, 17b), i quali sono tra loro indipendenti, sono magneticamente accoppiati allo statore (18), e sono montati sugli alberi (13a, 13b); ed

un unico convertitore (14) elettronico di potenza, il quale è collegato all'avvolgimento (20) statorico per alimentare l'avvolgimento (20) statorico stesso con una corrente (I_{TOT}) elettrica complessiva;

la macchina elettrica è **caratterizzata dal fatto che:**

un primo rotore (17a) è a magneti permanenti e presenta un primo numero (N_1) di coppie di poli;

un secondo rotore (17b) è a magneti permanenti e presenta un secondo numero (N_2) di coppie di poli diverso dal primo numero (N_1) di coppie di poli;

l'avvolgimento (20) statorico presenta un numero di fasi dispari ed almeno pari a cinque, quando viene percorso da un primo sistema pentafase di correnti (I_a) elettriche sinusoidali genera un primo campo (MF_a) magnetico rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al primo numero (N_1) di coppie di poli ed armoniche

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

trascurabili di ordine pari al secondo numero (N_2) di coppie di poli o ad un suo multiplo, e quando viene percorso da un secondo sistema pentafase di correnti (I_b) elettriche sinusoidali genera un secondo campo (MF_b) magnetico rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al secondo numero (N_2) di coppie di poli ed armoniche trascurabili di ordine pari al primo numero (N_1) di coppie di poli o ad un suo multiplo; e

il convertitore (14) elettronico di potenza genera un sistema pentafase complessivo di correnti (I_{TOT}) elettriche che circola attraverso l'avvolgimento (20) statorico ed è costituita dall'unione di un primo sistema pentafase di correnti (I_a) elettriche sinusoidali che genera un primo campo magnetico (MF_a) rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al primo numero (N_1) di coppie di poli ed armoniche trascurabili di ordine pari al secondo numero (N_2) di coppie di poli o ad un suo multiplo e di un secondo sistema pentafase di correnti (I_b) elettriche sinusoidali che genera un secondo campo magnetico (MF_b) rotante che presenta una armonica molto importante di ordine pari al secondo numero (N_2) di coppie di poli ed armoniche trascurabili di ordine pari al primo numero (N_1) di coppie di poli o ad un suo multiplo.

2) Macchina (12) elettrica secondo la rivendicazione 1 e comprendente una centralina (27) che determina il primo

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

sistema pentafase di correnti (I_a) elettriche sinusoidali unicamente in funzione delle esigenze di controllo del primo rotore (17a) e determina il secondo sistema pentafase di correnti (I_b) elettriche sinusoidali unicamente in funzione delle esigenze di controllo del secondo rotore (17b); il sistema pentafase complessivo di correnti (I_{TOT}) elettriche che viene fatto circolare attraverso l'avvolgimento (20) statorico è il risultato della somma del primo e del secondo sistema pentafase di correnti (I_a , I_b) elettriche sinusoidali.

3) Macchina (12) elettrica secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui i due sistemi pentafase di correnti (I_a , I_b) elettriche sinusoidali si differenziano tra loro per la diversa frequenza (f_a , f_b).

4) Macchina (12) elettrica secondo la rivendicazione 3, in cui una frequenza (f_a) del primo sistema pentafase di correnti (I_a) elettriche sinusoidali è direttamente proporzionale ad una velocità (ω_a) di rotazione del primo rotore (17a) ed una frequenza (f_b) del secondo sistema pentafase di correnti (I_b) elettriche sinusoidali è direttamente proporzionale ad una velocità (ω_b) di rotazione del secondo rotore (17b).

5) Macchina (12) elettrica secondo una delle rivendicazioni da 1 a 4, in cui i due sistemi pentafase di correnti (I_a , I_b) elettriche sinusoidali si differenziano

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

tra loro per l'angolo di ritardo esistente tra la corrente di una fase e la corrente della fase successiva.

6) Macchina (12) elettrica secondo una delle rivendicazioni da 1 a 5, in cui l'avvolgimento (20) statorico presenta un numero frazionario di cave per polo e per fase.

7) Macchina (12) elettrica secondo una delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui l'avvolgimento (20) statorico quando viene percorso da una corrente sinusoidale, cioè da una singola fase di un sistema multifase, genera un campo magnetico stazionario avente due armoniche dominanti, le quali sono molto più importanti delle altre armoniche.

8) Macchina (12) elettrica secondo la rivendicazione 7, in cui le due armoniche dominanti del campo magnetico stazionario sono all'incirca simili.

9) Macchina (12) elettrica secondo la rivendicazione 7, in cui le due armoniche dominanti campo magnetico stazionario sono tra loro vicine.

10) Macchina (12) elettrica secondo una delle rivendicazioni da 1 a 9, in cui la differenza tra il primo numero (N1) di coppie di poli ed il secondo numero (N2) di coppie di poli è intero e pari a uno.

11) Macchina (12) elettrica secondo una delle rivendicazioni da 1 a 10, in cui:

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

lo statore (18) presenta una forma tubolare cilindrica ed alloggia al proprio interno i due rotori (17) che sono tra loro coassiali e sono disposti uno di fianco all'altro;

è previsto un elemento (23) di separazione, il quale presenta una forma piatta circolare, divide lo statore (18) in due parti, è disposto tra i due rotori (17), è realizzato in materiale amagnetico, e supporta due cuscinetti (24), ciascuno dei quali è accoppiato ad un rispettivo albero (13).

12) Veicolo (1) comprendente:

almeno due ruote (2) motrici disposte su di uno stesso assale; ed

almeno una macchina (12) elettrica comprendente un unico statore (18), due alberi (13a, 13b), i quali sono tra loro indipendenti e montati girevoli e sono solidali alle due ruote (2) motrici, almeno due rotori (17a, 17b), i quali sono tra loro indipendenti, sono magneticamente accoppiati allo statore (18), e sono montati sugli alberi (13a, 13b), ed un unico convertitore (14) elettronico di potenza, il quale è collegato all'avvolgimento (20) statorico per alimentare l'avvolgimento (20) statorico stesso con una corrente (I_{TOT}) elettrica complessiva;

il veicolo (1) è **caratterizzato dal fatto che** la macchina (12) elettrica è realizzata secondo una delle rivendicazioni da 1 a 11.

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

13) Veicolo (1) secondo la rivendicazione 12, in cui gli alberi (13) della macchina (12) elettrica costituiscono anche i semiassi delle ruote (2) motrici.

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N.987/BM)

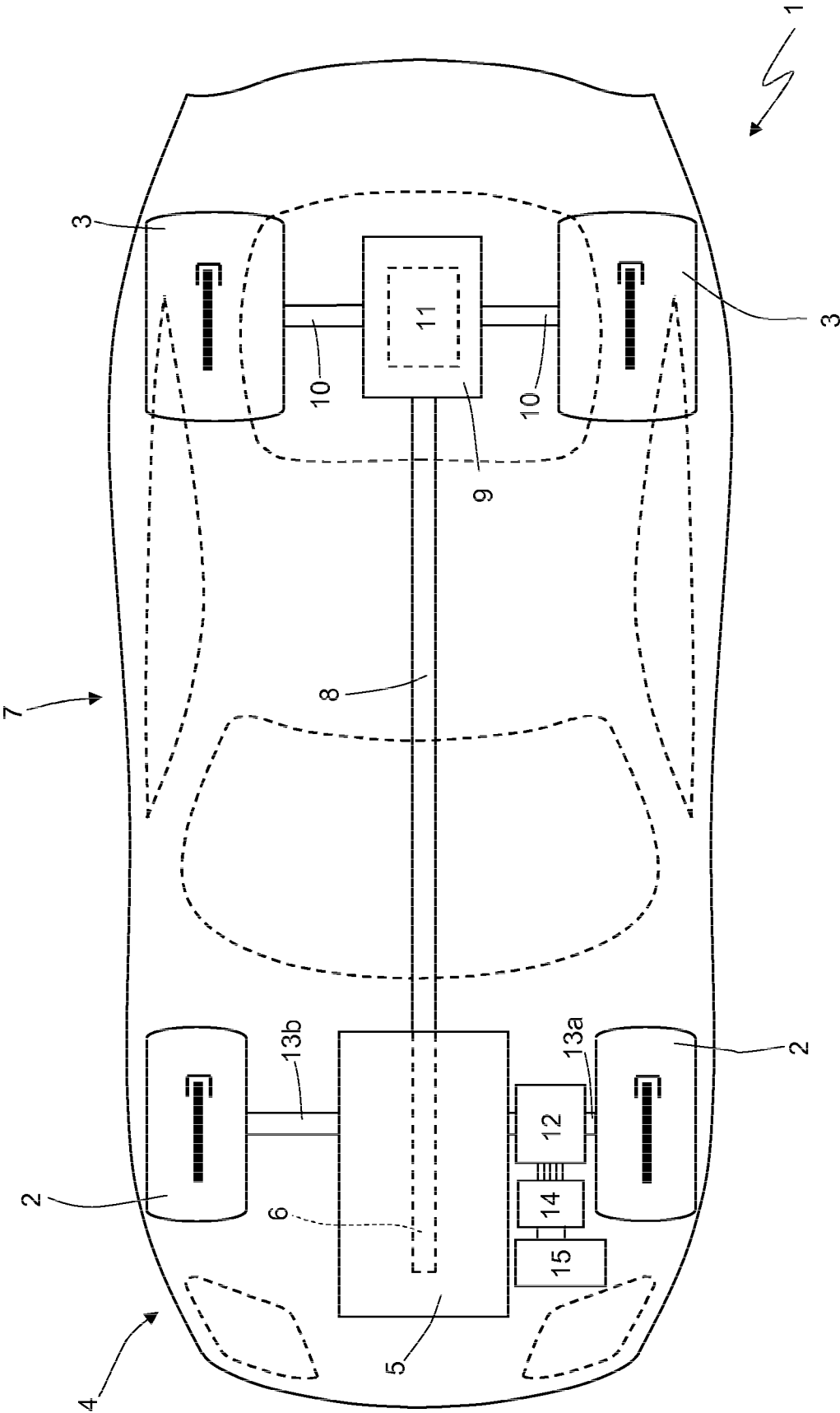
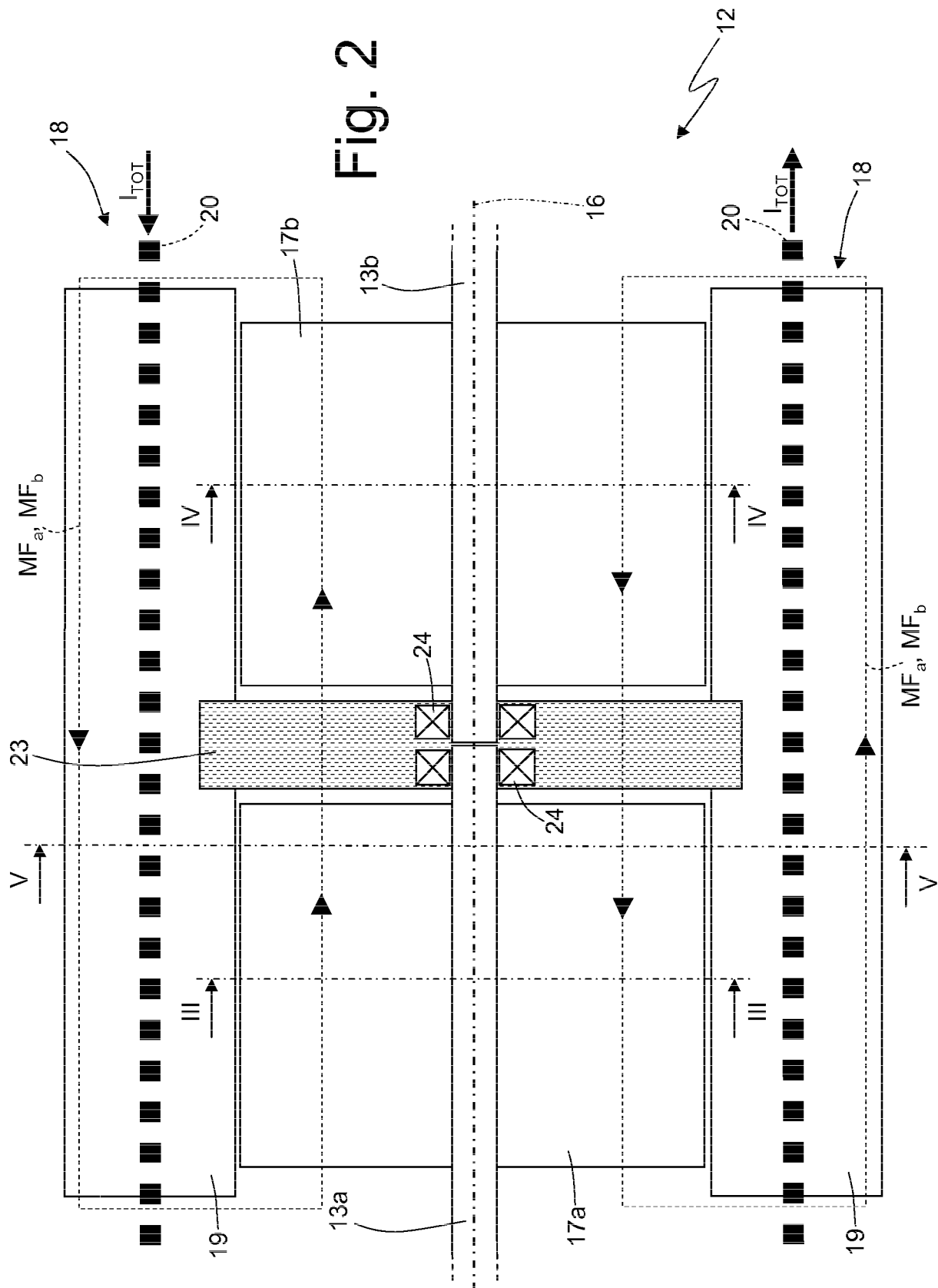


Fig. 1

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.
Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)



p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN

(Iscrizione Albo N. 987/BM)

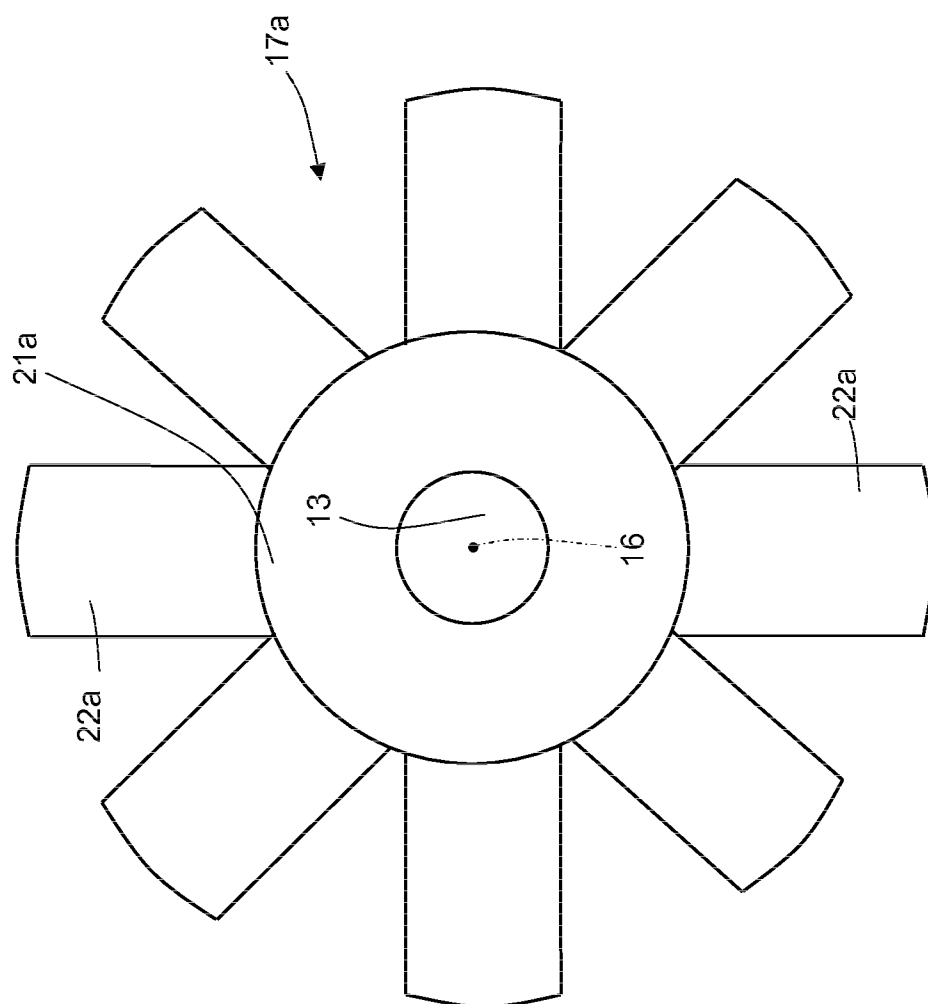
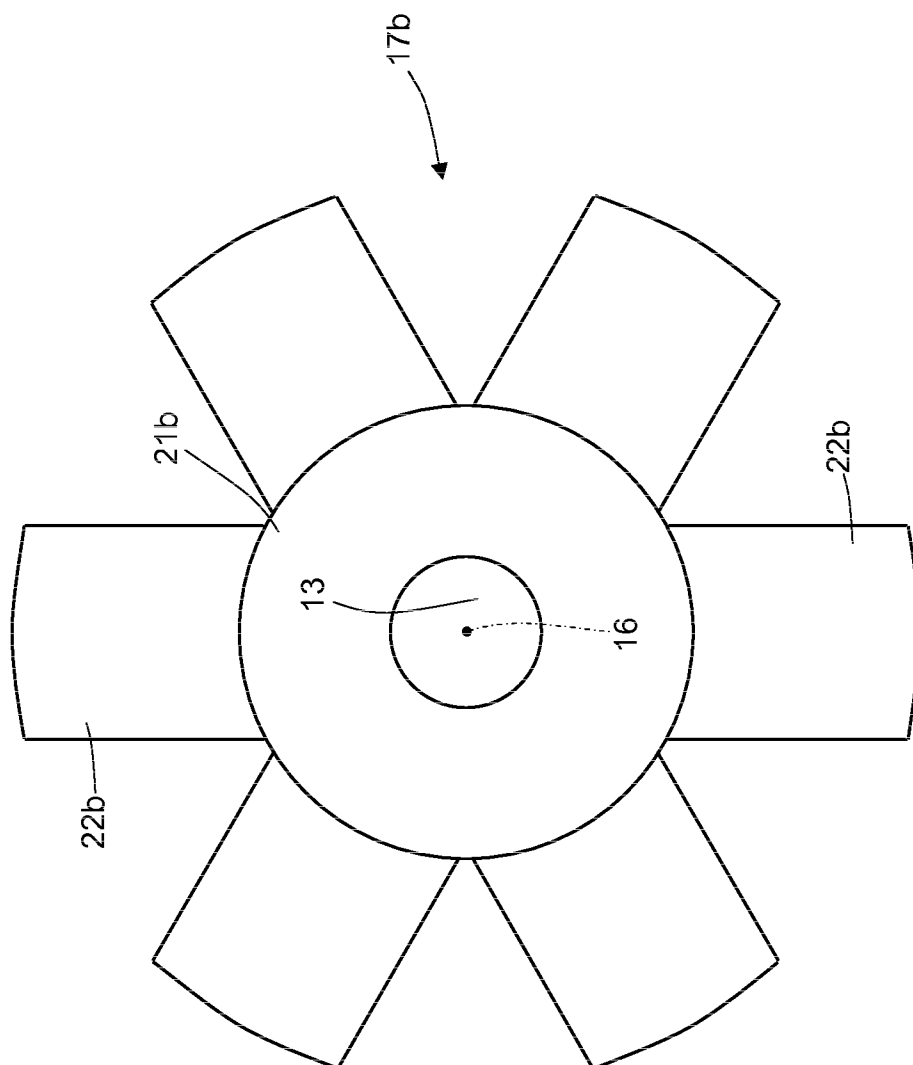


Fig. 3

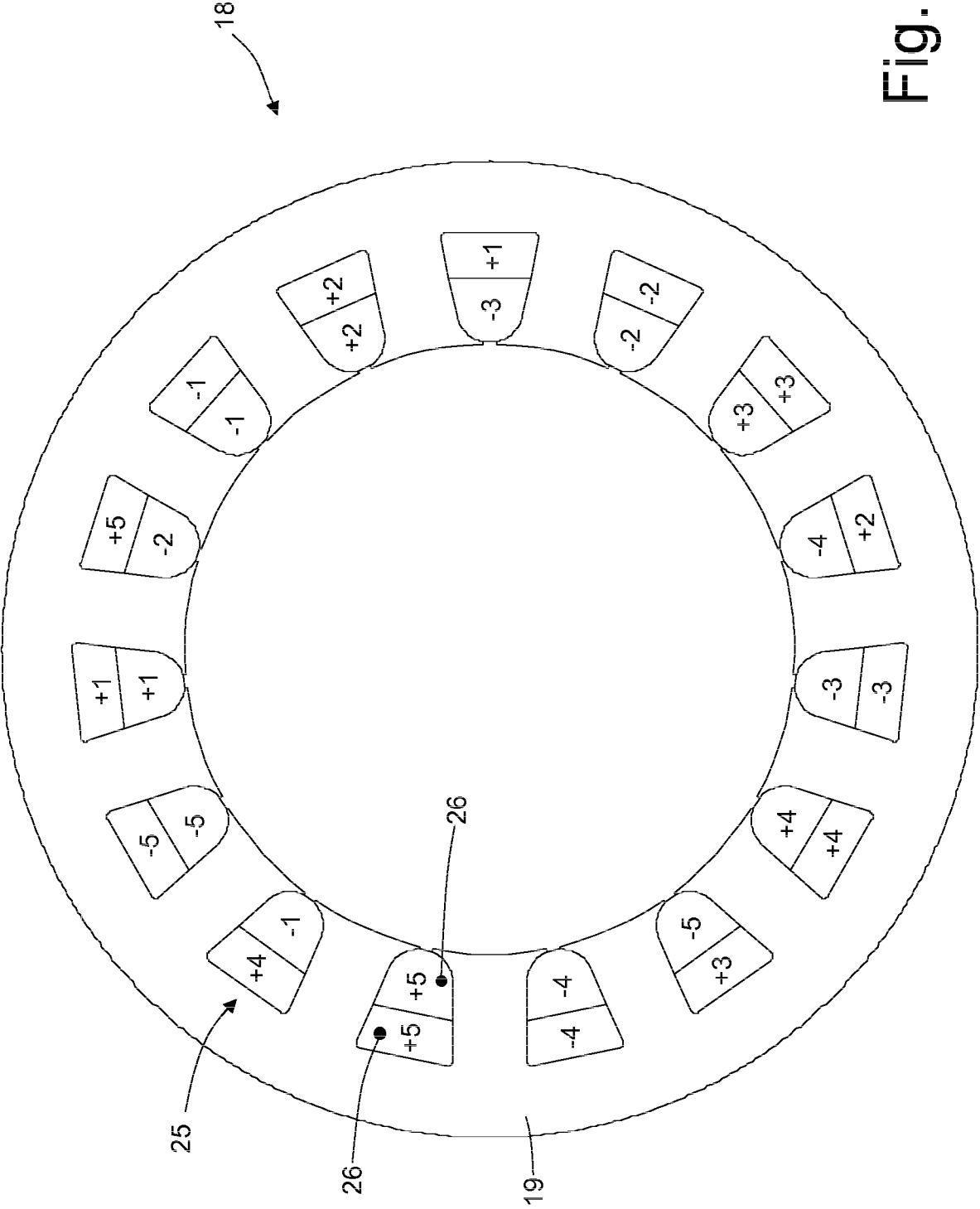
Fig. 4



p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)

Fig. 5



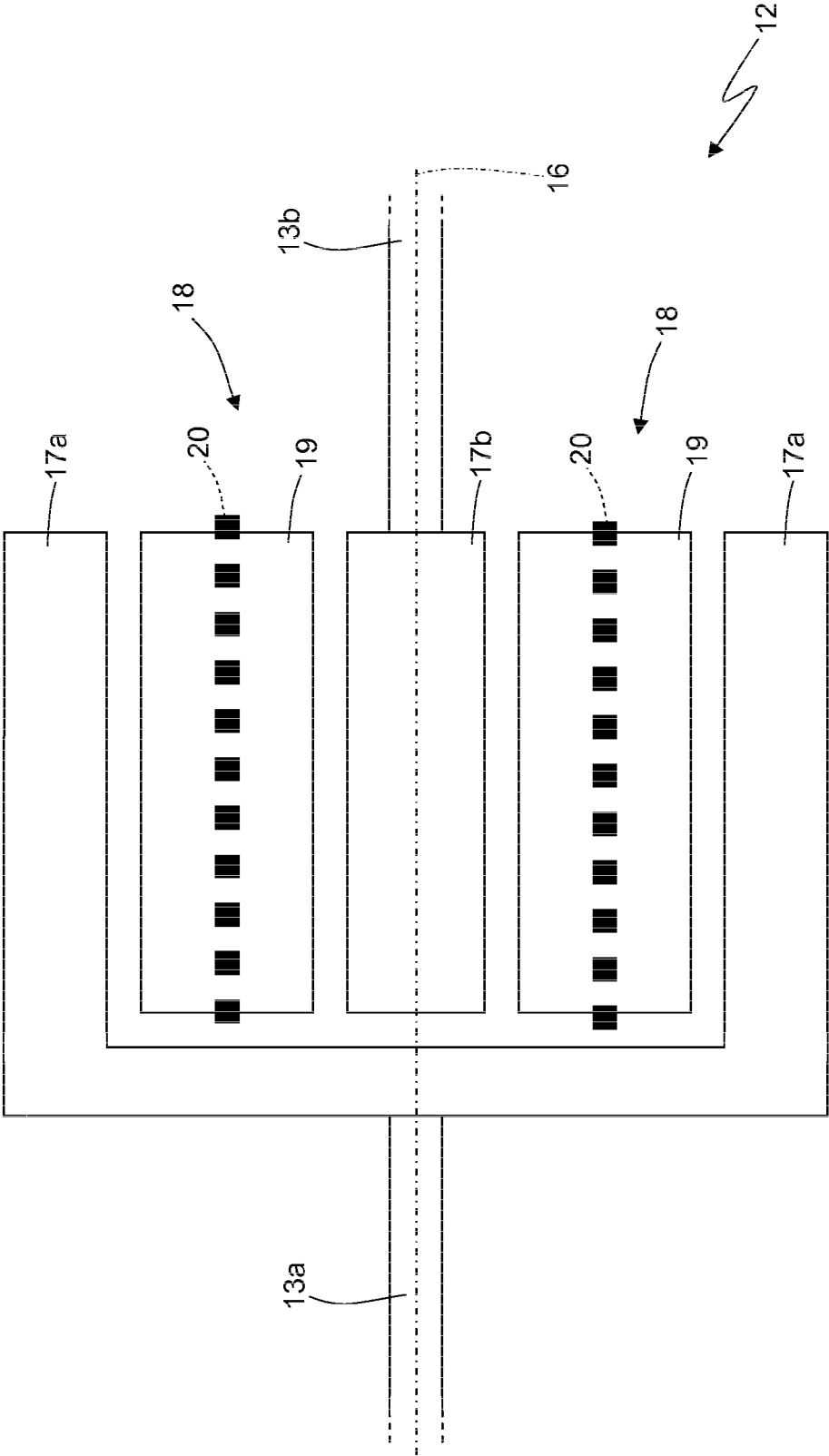


Fig. 6

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)

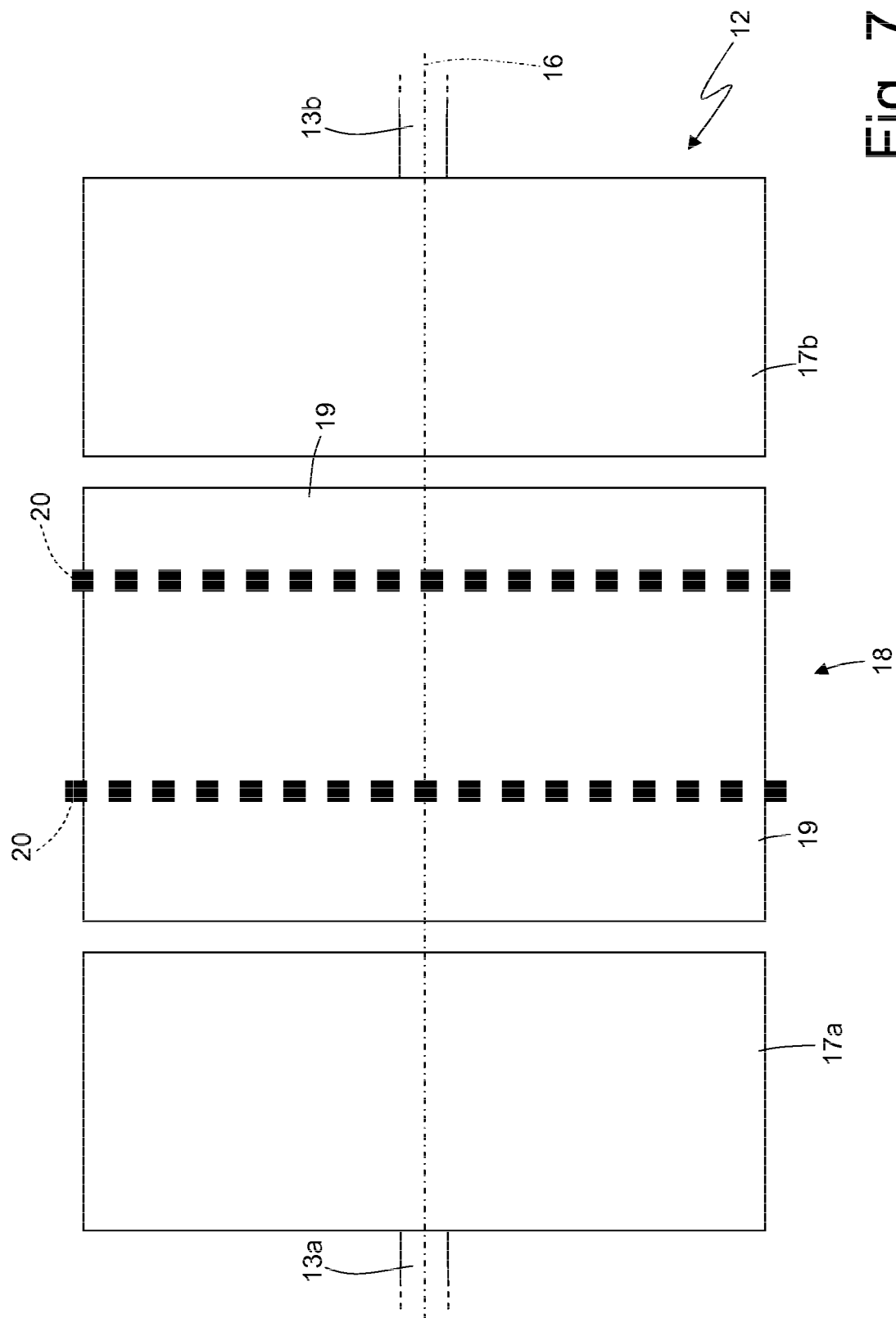


Fig. 7

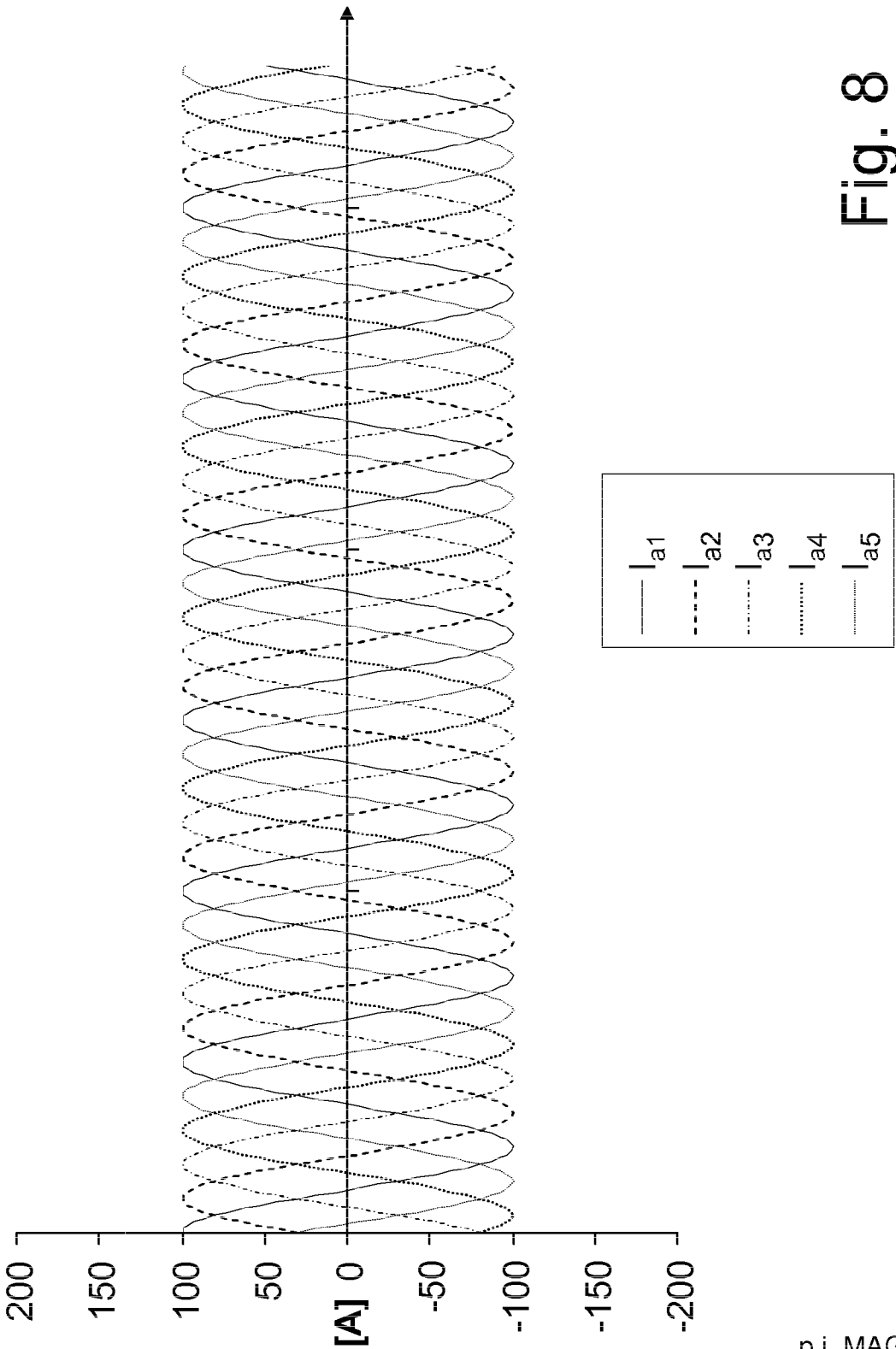


Fig. 8

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)

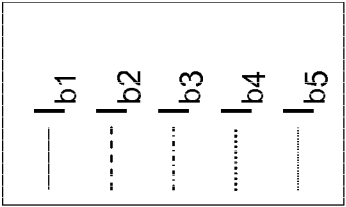
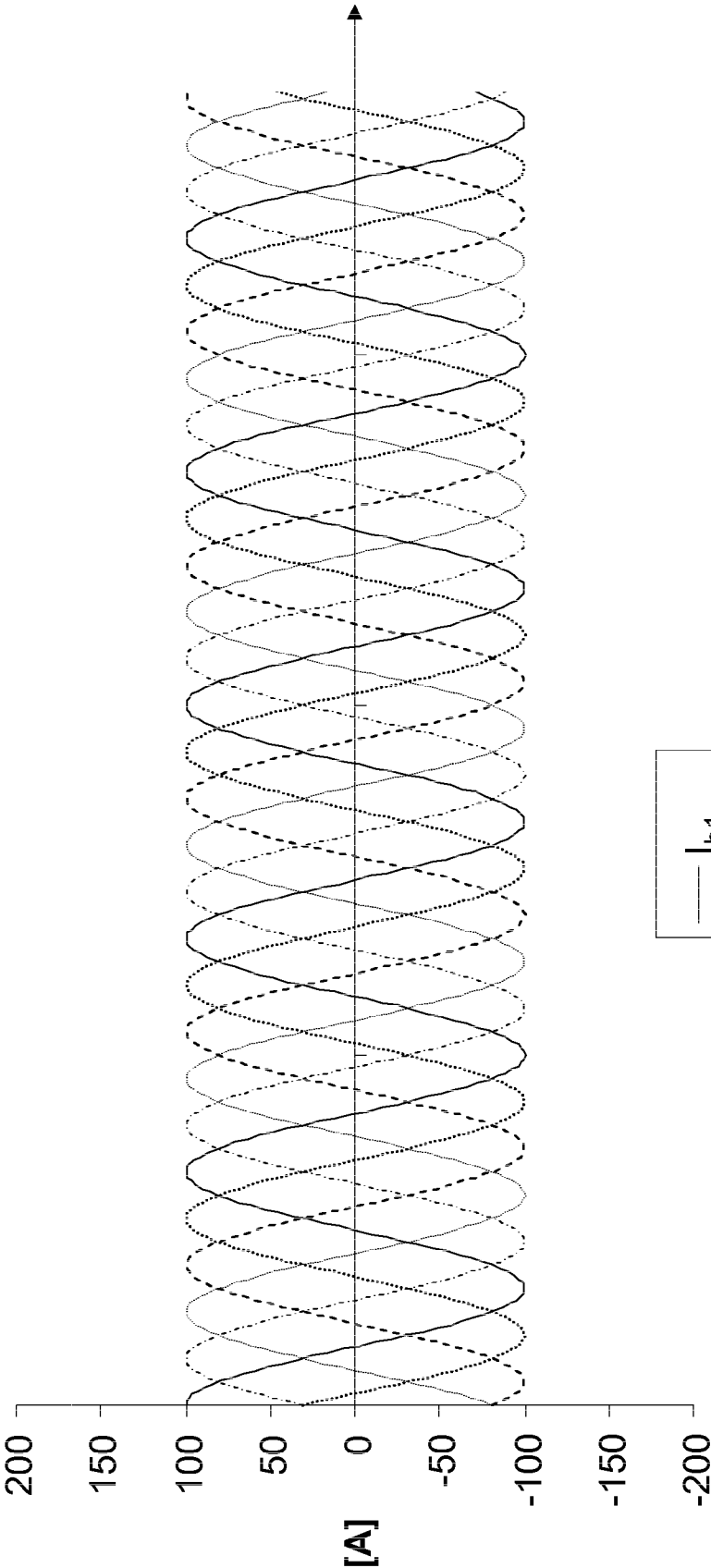


Fig. 9

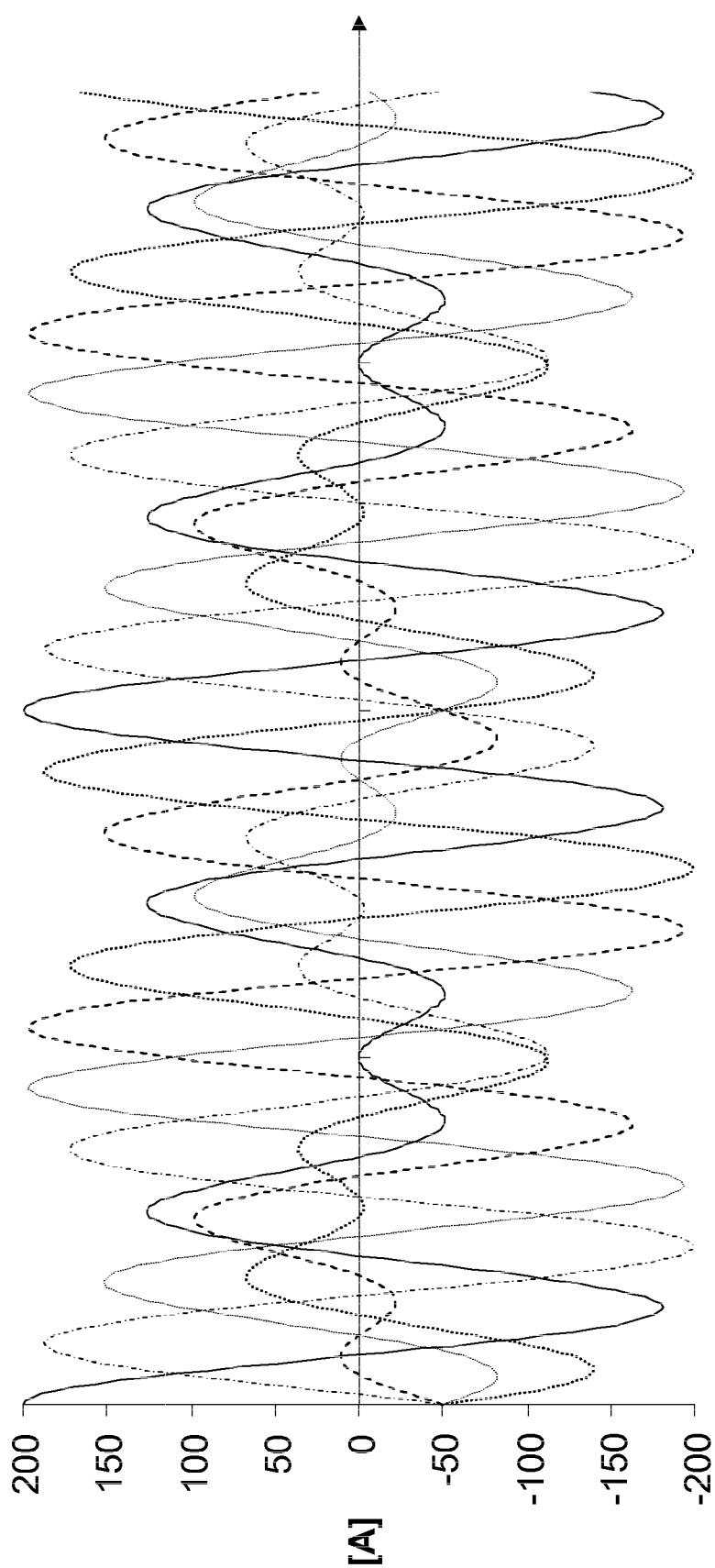


Fig. 10

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.
Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)

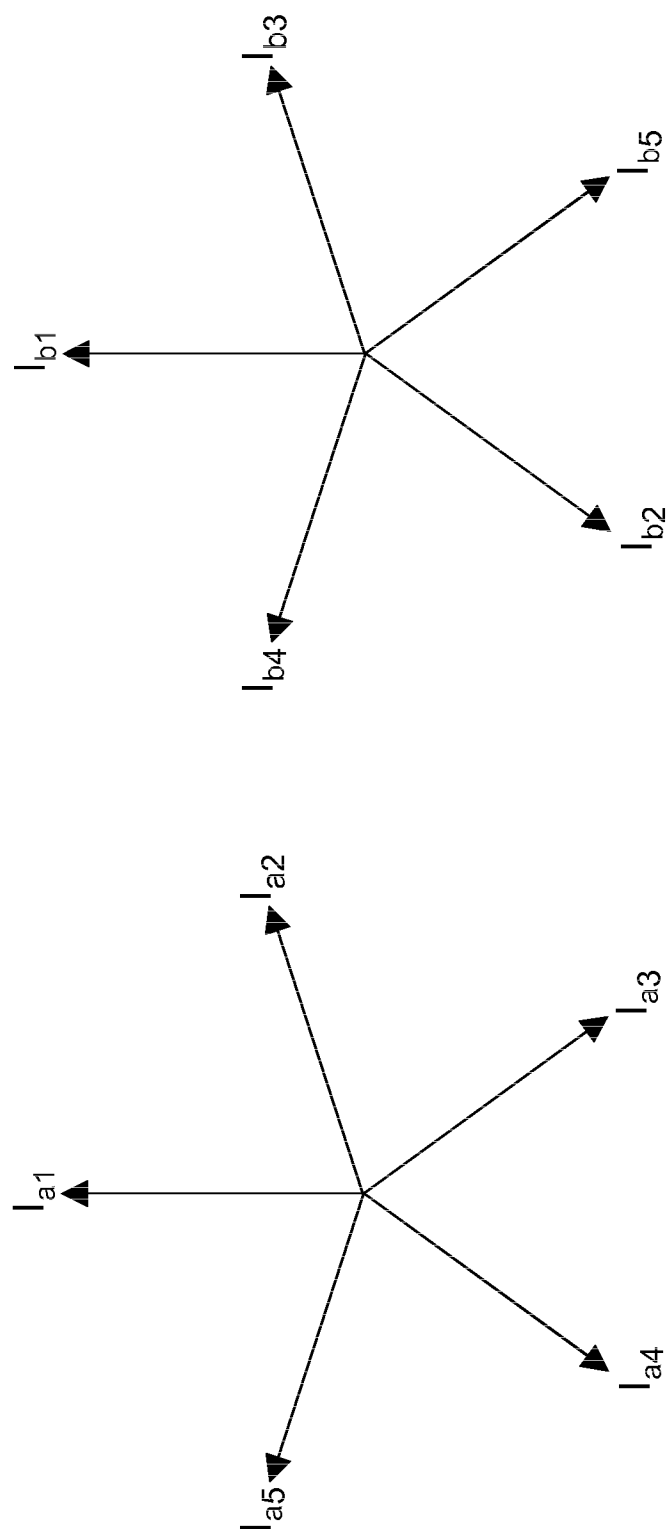


Fig. 11

p.i. MAGNETI MARELLI S.P.A.

Matteo MACCAGNAN
(Iscrizione Albo N. 987/BM)

