



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0203467-0 B1**



**(22) Data do Depósito: 07/01/2002**

**(45) Data de Concessão: 10/11/2020**

---

**(54) Título:** SISTEMA DE FORNO DE INDUÇÃO E MÉTODO DE FUNDIR E AQUECER INDUTIVAMENTE UM MATERIAL ELETRICAMENTE CONDUTOR EM UM CADINHO

**(51) Int.Cl.:** H05B 6/24.

**(30) Prioridade Unionista:** 08/01/2001 US 60/260241.

**(73) Titular(es):** INDUCTOTHERM CORP..

**(72) Inventor(es):** OLEG S. FISHMAN; VLADIMIR V. NADOT; VITALY A. PEYSAKHOVICH; JOHN H. MORTIMER.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2002000236 de 07/01/2002

**(87) Publicação PCT:** WO 2002/054831 de 11/07/2002

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 05/09/2002

**(57) Resumo:** "SISTEMA DE FORNO DE INDUÇÃO E MÉTODO DE FUNDIR E AQUECER INDUTIVAMENTE UM MATERIAL ELETRICAMENTE CONDUTOR EM UM CADINHO". Um sistema de forno de indução tem uma bobina de indução ativa envolvendo um cadinho. Uma bobina de indução passiva também envolve o cadinho. A bobina de indução passiva fica conectada em paralelo com um capacitor para formar um circuito tanque L-C. Uma fonte de corrente ac é provida para ativar a bobina de indução para produzir um campo magnético que aquece e funde indutivamente um material eletricamente condutor no cadinho. O campo magnético também acopla magneticamente com a bobina de indução passiva para induzir uma corrente na bobina de indução passiva. Esta corrente induzida gera um campo magnético que aquece e funde indutivamente o material. A resistência do circuito tanque LC é refletida no circuito da bobina de indução ativa para melhorar a eficiência global do sistema de forno de indução. O cadinho pode ter a extremidade aberta para permitir a passagem de material eletricamente condutor pelo cadinho durante o processo de aquecimento.

## SISTEMA DE FORNO DE INDUÇÃO E MÉTODO DE FUNDIR E AQUECER INDUTIVAMENTE UM MATERIAL ELETRICAMENTE CONDUTOR EM UM CADINHO

[001] Este pedido de patente reivindica o benefício do pedido de patente provisório US no. 60/260.241, depositado em 8 de janeiro de 2001.

[002] A presente invenção diz respeito, no geral, a fornos de indução elétricos e, mais particularmente a fornos de indução com sistemas de bobina de maior eficiência.

[003] Fornos de indução elétricos são usados para aquecer e fundir metais e outros materiais eletricamente condutores. Um forno de indução utiliza uma bobina de indução que é energizada por uma fonte de potência ca. A corrente alternada que passa pela bobina cria um campo magnético que é aplicado à carga eletricamente condutora colocado no interior do cadinho do forno. Correntes parasitas induzidas pelo campo na carga podem ser usadas para aquecer, fundir e superaquecer a carga. O acoplamento magnético entre a bobina de indução e a carga é análogo a um acoplamento de transformador magnético. Entretanto, uma bobina de indução tem uma indutância de dispersão muito maior do que a indutância de dispersão de um transformador magnético. Conseqüentemente, um fator de potência do forno de indução é extremamente baixo, tipicamente variando de 0,08 a 0,15, com retardamento e, portanto, com uma carga extremamente ineficiente.

[004] O forno de indução sem núcleo convencional consiste de uma bobina espiral de cobre resfriada a água com um cadinho cerâmico que contém a carga. A corrente alternada na bobina gera um campo magnético que induz a corrente na carga condutora. Conforme ilustrado na figura 1(a), o forno de indução 100 pode ser visto como um transformador acoplado solto, em que as espiras da bobina primária são acopladas magneticamente a uma única espira formada pelo banho líquido condutor 102. Na figura,  $I_c$  representa a corrente da bobina e  $I_m$  representa a corrente do banho líquido.

Portanto, pode-se considerar que a relação da corrente induzida no banho líquido para a corrente na bobina se aproxima do número de espiras da bobina. A densidade de corrente máxima é induzida na circunferência do banho líquido, com a corrente diminuindo exponencialmente na profundidade do banho líquido em direção ao centro do cadinho.

[005] A taxa de diminuição é definida por uma constante, a saber a profundidade de penetração de corrente no metal,  $\Delta_m$ , definida (em metro) pela equação seguinte:

$$\Delta_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_m}{\mu_o \cdot \mu_m \cdot f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho_m}{f}}$$

em que

$\rho_m$  = resistividade do metal fundido (em ohms/m);

$\mu_o \cdot \mu_m$  = produto da permeabilidade absoluta e relativa (com  $\mu_o = 4 \pi \times 10^{-7}$  e  $\mu_m$ , a permeabilidade relativa do metal, em H/m); e

$f$  = frequência da corrente da bobina (em Hertz).

[006] Fornos de indução são normalmente projetados para satisfazer a condição de que a profundidade de penetração de corrente no metal seja muito menor do que o raio do banho líquido ( $\Delta_m \ll r_m$ ).

[007] A forma convencional do banho líquido é cilíndrica. A maior parte da corrente induzida flui na camada externa do banho líquido com espessura igual à profundidade de penetração,  $\Delta_m$ . A resistência,  $R_m$ , (em ohms) desta camada pode ser estimada pela equação seguinte:

$$R_m = \frac{\rho_m \cdot 2\pi \cdot r_m}{h_m \cdot \Delta_m} = 0.0125 \cdot \frac{r_m}{h_m} \sqrt{\frac{f}{\rho_m}}$$

em que

$R_m$  = resistência do banho líquido (em ohms);

$r_m$  = raio do banho líquido;

$H_m$  = altura do banho líquido;

$\rho_m$ ,  $\Delta_m$  e  $f$  são conforme previamente definidos.

[008] Fornos de indução são basicamente dispositivos monofásicos. A potência elétrica suprida é tipicamente distribuída pelas linhas trifásicas balanceadas. Para operação ideal, os fornos de indução operam a frequências tipicamente na faixa de 100 a 10.000 Hertz. Essas frequências são necessárias para manter uma relação  $\Delta_m/r_m$  ideal para agitação eletromagnética do metal fundido no forno.

[009] Conversores de potência de estado sólido geram a potência na frequência, tensão e corrente requeridas pelos fornos de indução. Esses conversores utilizam semicondutores de potência (tais como topologias SCR, IGBT ou IGCT). O conversor de potência de estado sólido resolve o problema do balanceamento de fase. Tensões de linha de entrada de 3, 6 ou 12 fases são retificadas antes de ser invertidas numa corrente elétrica de frequência média monofásica. A retificação de onda completa de tensão de linha monofásica produz uma baixa distorção harmônica nas linhas elétricas de alimentação, eliminando-se assim a necessidade de filtros de linha. Conforme ilustrado na figura 1(b), o conversor de potência consiste de três seções principais:

- um retificador ca em cc e filtro cc;
- um inversor de frequência média de cc em ca; e
- um banco de capacitores de sintonia.

[0010] A potência suprida ao forno é controlada automaticamente variando-se o sincronismo de comutação dos componentes de chaveamento de estado sólido do inversor. Este sincronismo determina a frequência de operação, fase e amplitude da corrente do forno.

[0011] Existem duas implementações convencionais de conversores de potência de estado sólido estáticos, a saber um inversor de corrente alimentada com um banco de capacitores em paralelo e um inversor de tensão alimentada com banco de capacitores em série. A figura 2(a) ilustra um

sistema de forno que utiliza um conversor de corrente alimentada. A figura 2(b) ilustra um sistema de forno que utiliza um conversor de corrente alimentada com capacitores de banco em série/paralelo. A figura 2(c) e a figura 2(d) ilustram sistemas de forno que utilizam um conversor de tensão alimentada em configurações de ponte completa ou semicompleta, respectivamente. Cada uma dessas topologias de suprimento de potência compreende uma seção de retificador e filtro 110; uma seção do inversor de estado sólido 120; e uma seção de capacitor de sintonia 130. Embora o símbolo geralmente reconhecido de uma SCR seja usado nesses conjuntos de figuras, outros dispositivos de comutação de estado sólido podem ser utilizados nessas aplicações.

[0012] No inversor de corrente alimentada, conforme ilustrado na figura 2(a), o banco de capacitores de correção de fator de potência fica normalmente conectado em paralelo à bobina do forno. O termo “banco de capacitores” é aqui usado para designar um ou mais capacitores conectados em série ou em paralelo ao circuito equivalente, conforme mostrado nas figuras. Tanto o banco de capacitores como a bobina são conectadas na diagonal de um inversor de ponte completa. Esta conexão permite que o componente reativo da corrente da bobina desvie dos componentes de comutação de estado sólido do inversor. Entretanto, o inversor fica exposto a toda a tensão do forno. Os valores de tensão do inversor podem ser superiores ou inferiores à tensão cc no retificador. Portanto, as seções do retificador e inversor cc devem ser desacoplados por reatores. Os reatores abastecem o inversor com corrente cc constante. Eles estão agindo como um filtro e um reservatório de potência. O inversor converte corrente contínua em corrente de onda quadrada que é suprida a um circuito ressonante paralelo.

[0013] A potência do forno em sistemas inversores de corrente alimentada é controlada tanto variando o sincronismo do inversor como a tensão cc. Quando a tensão do inversor cai abaixo do potencial do retificador

cc, a potência de saída não pode ser controlada pela variação na frequência de comutação do inversor sozinha. O controle adicional da corrente contínua injetada é realizado regulando-se o ângulo de fase de condução do retificador SCRs. Tal regulagem introduzirá distorção na linha elétrica de alimentação, a menos que sejam providos filtros.

[0014] A principal vantagem do inversor ressonante paralelo é que somente parte da corrente da bobina passa via dispositivos de comutação de estado sólido, economizando-se assim a quantidade de dispositivos semicondutores. O inversor controla somente parte da corrente da bobina. Isto, entretanto, limita a capacidade de controle do inversor. A utilização de reatores cc de nivelamento como acumuladores de potência temporários causa dificuldades na iniciação dos inversores. A potência nos reatores é cinética (análoga à potência de uma roda louca) – ela só existe quando a corrente contínua flui do retificador para o inversor. Para acumular a potência necessária no reator cc de nivelamento, é usada uma rede de partida especial. Quando o inversor paralelo para, a potência deste reator é gasta usando as comutações de estado sólido do inversor como um circuito de alavanca.

[0015] A vantagem de menor corrente nos dispositivos de comutação de estado sólido do inversor é compensado por uma alta tensão à qual esses dispositivos ficam expostos. Isto geralmente requer empilhamento de dispositivos em série, que, por sua vez, necessita divisores de tensão dinâmicas especiais. Para inversores de corrente alimentada pequenos conectados a linhas de baixa tensão padrões, uma conexão em série/paralela de capacitores é usada, conforme ilustrado na figura 2(b), em vez de um circuito ressonante paralelo.

[0016] Do ponto de vista da teoria de circuito elétrico, inversores ressonantes em série alimentados de tensão, conforme ilustrados na figura 2(c), representam um circuito de dualidade ao conversor paralelo alimentado de corrente. Os reatores de nivelamento de corrente na linha cc são

substituídos por capacitores de filtro de tensão cc. O circuito ressonante paralelo de saída é substituído por um circuito ressonante em série. A tensão no inversor é constante e igual à tensão de saída do retificador ca em cc. Toda a corrente da bobina flui pelos SCRs do inversor e do banco de capacitores de sintonia. Uma configuração como esta fornece uma excelente capacidade de controle do sistema. Controlando-se o sincronismo de comutação dos dispositivos de chaveamento de estado sólido do inversor, é possível alterar rapidamente (dentro de um período de oscilação) a quantidade de potência que circula no circuito ressonante.

[0017] A potência elétrica potencial no banco de capacitores de filtro cc pode ser mantida indefinidamente independente do estado do inversor. Durante cada ciclo, a potência reativa flui tanto do filtro para o forno via os dispositivos de comutação de estado sólido como do forno para o filtro via diodos antiparalelos.

[0018] Por causa da boa capacidade de controle da seção do inversor, não existe nenhuma necessidade de controlar a tensão cc. Uma vez que o controle de fase não se aplica ao retificador, o fator de potência de entrada na linha de alimentação é relativamente constante. Não é necessário nenhum capacitor de correção de fase ca ou filtros de linha. A implementação prática de conversores ressonantes em série é ainda mais simplificada pela utilização de um esquema inversor em semiponte, conforme ilustrado na figura 2(d).

[0019] Um inversor de corrente alimentada opera com maior tensão, enquanto que um inversor de tensão alimentada opera com baixa tensão, mas com corrente de bobina total. O inversor de tensão alimentada tem melhor capacidade de controle e armazena potência reativa completamente nos capacitores, que têm menores perdas do que os reatores cc do inversor de corrente alimentada. Em todas essas configurações da tecnologia anterior de sistemas de fornos de indução, a bobina do forno é, conforme supranotado, uma carga elétrica extremamente ineficiente. Portanto, existe a necessidade

de um sistema de bobina de maior eficiência para um forno de indução.

[0020] De acordo com um aspecto, a presente invenção é um aparelho e método para aquecer e fundir eletricamente material condutivo no cadinho de um sistema de forno de indução que inclui uma bobina de indução passiva em volta de uma seção parcial do cadinho. A bobina de indução passiva fica conectada a um capacitor para formar um circuito tanque L-C. Uma bobina de indução ativa, envolvendo uma seção parcial do cadinho, é suprida como corrente alternada de uma fonte de potência ca. A corrente alternada gera um primeiro campo magnético que aquece e funde o material eletricamente condutor e, pelo acoplamento magnético com a bobina passiva, induz uma corrente induzida na bobina passiva. Esta corrente induzida gera um segundo campo magnético que aquece e funde o material eletricamente condutor. A resistência do circuito tanque L-C é refletida no circuito da bobina de indução ativa para aumentar a eficiência do sistema de forno de indução. Esses e outros aspectos da invenção estão apresentados na especificação e reivindicações.

[0021] Com propósito de ilustração da invenção, está mostrada nos desenhos uma forma que é atualmente preferida; entende-se, entretanto, que esta invenção não se limita aos arranjos e instrumentações precisas mostradas. Nos desenhos,

[0022] A figura 1(a) é uma vista seccional transversal de um cadinho convencional que ilustra a distribuição de corrente induzida.

[0023] A figura 1(b) é o cadinho da figura 1(a) conectado a uma fonte de potência convencional para formar um sistema de forno de indução.

[0024] A figura 2(a) é uma planta diagramática de um sistema de forno de indução convencional que utiliza um conversor alimentado em corrente.

[0025] A figura 2(b) é uma planta diagramática de um sistema de forno de indução convencional que utiliza um conversor de alimentado em

corrente com capacitores tanque em série/paralelo.

[0026] A figura 2(c) é uma planta diagramática de um sistema de forno de indução convencional que utiliza um inversor alimentado em tensão.

[0027] A figura 2(d) é uma planta diagramática de um sistema de forno de indução convencional que utiliza capacitores tanque em série.

[0028] A figura 3(a) é uma planta diagramática que ilustra um exemplo de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0029] A figura 3(b) é um esquema simplificado que ilustra um exemplo de um sistema de forno de indução com o sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0030] A figura 3(c) é um esquema simplificado que ilustra um outro exemplo de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0031] A figura 4 é um gráfico que ilustra a magnitude de potência disponível para aquecer e fundir por indução em função de frequência do sistema para um sistema de forno de indução da presente invenção.

[0032] A figura 5 é um gráfico que ilustra a magnitude da impedância de entrada do sistema de forno de indução em função da frequência do sistema para um exemplo do sistema de forno de indução da presente invenção.

[0033] A figura 6 é um gráfico que ilustra a magnitude do fator de potência de carga da bobina para o sistema de forno de indução em função da frequência do sistema para um exemplo do sistema de forno de indução da presente invenção.

[0034] A figura 7 é um gráfico que ilustra a magnitude da reatância de entrada do sistema de bobina de indução em função da frequência do sistema para um exemplo do sistema de forno de indução da presente invenção.

[0035] A figura 8(a) é uma planta diagramática que ilustra um outro exemplo de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0036] A figura 8(b) é um esquema simplificado de um outro exemplo de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0037] A figura 9(a) é uma planta diagramática que ilustra um outro exemplo do sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0038] A figura 9(b) é um esquema simplificado que ilustra um outro exemplo de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0039] A figura 10 é um diagrama de vetor que ilustra as vantagens de um sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0040] A figura 11 é um esquema simplificado que ilustra um outro exemplo de um exemplo de sistema de forno de indução com sistema de bobina de maior eficiência da presente invenção.

[0041] Referindo-se agora aos desenhos, em que números iguais indicam elementos iguais, está mostrado nas figuras 3(a) e figura 3(b), de acordo com a presente invenção, um exemplo de um sistema de forno de indução 10 que utiliza um sistema de bobina de alta eficiência.

[0042] A bobina  $L_1$  (bobina ativa) é conectada em seus terminais de extremidade à fonte de potência ca 20 que está operando a uma tensão e frequência controlável para produzir a corrente  $I_1$  na bobina  $L_1$ . A bobina  $L_2$  (bobina passiva) é conectada ao capacitor  $C_2$  para formar um circuito tanque L-C em paralelo. O campo magnético criado pelo fluxo de corrente na bobina  $L_1$  cria um campo de fluxo que é magneticamente acoplado à bobina  $L_2$  (conforme indicado pela indutância mútua  $M$  nas figuras), que induz corrente

$I_2$  na bobina  $L_2$ . A corrente induzida  $I_2$  tem a mesma frequência da corrente  $I_1$ . Os campos magnéticos criados pela corrente que flui nas bobinas  $L_1$  e  $L_2$  aquecerão e fundirão indutivamente o material eletricamente condutor 12 colocado no cadinho 13.

[0043] A magnitude e fase de  $I_2$  também depende dos valores de impedância selecionados da bobina  $L_2$  e do capacitor  $C_2$  no circuito tanque formado por esses componentes.

[0044] A tensão na bobina  $L_2$  gera uma tensão de retorno na bobina  $L_1$ , que opõe à tensão de alimentação que controla o fluxo de corrente  $I_1$  em  $L_1$ . Em decorrência disto, a bobina  $L_1$  retira menos corrente do inversor enquanto o sistema de forno de indução 10 gera a mesma magnitude de potência, permitindo assim a redução de tamanho dos componentes elétricos do suprimento de potência, ao mesmo tempo em que mantém o mesmo nível de potência de aquecimento e de fusão.

[0045] Além disso, a reatância do capacitor  $C_2$  no circuito tanque melhora substancialmente o fator de potência de baixo retardamento da bobina de indução para fornecer um sistema de bobina de maior eficiência.

[0046] Embora um conversor de meia-ponte de tensão alimentada com capacitor tanque em série seja usados na figura 3(a), a figura 3(b) ilustra um exemplo mais genérico do sistema de forno de indução da presente invenção, em que o conversor (suprimento de potência) está identificado genericamente como o elemento 21. Na figura 3(a), que, para este exemplo da invenção, está configurado como um capacitor de conversor de meia ponte  $C_1$ , está mostrado como uma capacitância distributiva na meia ponte, enquanto que na figura 3(b) o capacitor  $C_1$  está mostrado no geral como um elemento de circuito único.

[0047] O sistema de bobina de alta eficiência da presente invenção pode ser utilizado com vários tipos de topologias de suprimento de potência, tal como (apesar de não estar limitado) conversores de tensão alimentada

ressonantes em série e conversores que utilizam modulação pela largura do pulso, para tirar proveito do sistema de bobina de maior eficiência.

[0048] A presente invenção pode ainda ser entendida pelo diagrama de vetores mostrado na figura 10. Na figura, com relação ao circuito de bobina ativa, o vetor OV representa a corrente  $I_1$  na bobina ativa  $L_1$ , conforme ilustrado na figura 3(a) até a figura 3(b). O vetor OA representa o componente resistivo da tensão da bobina ativa,  $I_1 R_1$  ( $R_1$  não está mostrado nas figuras). O vetor AB representa o componente indutivo da tensão da bobina ativa,  $\omega L_1 I_1$  (em que  $\omega$  é igual a  $2\pi$  vezes  $f$ , a frequência operacional do suprimento de potência). O vetor BC representa a tensão,  $\omega M I_2$ , induzida pela bobina passiva  $L_2$  na bobina ativa  $L_1$ . O vetor CD representa a tensão,  $I_2 / \omega C_1$ , os capacitores em série  $C_1$  conectados entre a seção do inversor do suprimento de potência e a bobina ativa  $L_1$ . O vetor OD representa a tensão de saída,  $V_{inv}$ , do inversor (terminais 3 e 4 na figura 3(a)).

[0049] Com relação ao circuito de bobina passivo, o vetor OW representa a corrente  $I_2$  na bobina passiva  $L_2$  que é induzida pelo campo magnético produzido pela corrente  $I_1$ . O vetor OF representa o componente resistivo da tensão da bobina passiva,  $I_2 R_2$  ( $R_2$  não mostrado nas figuras). O vetor FE representa o componente indutivo da tensão da bobina passiva,  $\omega L_2 I_2$ . O vetor EG representa a tensão,  $\omega M I_1$ , induzida pela bobina ativa  $L_1$  na bobina passiva. O vetor GO representa a tensão,  $I_2 / \omega C_2$ , no capacitor  $C_2$ , que está conectado na bobina passiva  $L_2$ .

[0050] O circuito de bobina ativa é comandado pela fonte de tensão,  $V_{inv}$ , enquanto que o laço da bobina passiva não fica conectado a uma fonte de potência ativa. Uma vez que as bobinas ativa e passiva são mutuamente acopladas, o vetor BC é adicionado ao vetor OB, que representa a tensão ( $V'_{forno}$ ) pela bobina do forno ativa na ausência de um circuito de bobina de forno capacitiva passiva, para resultar no vetor OC, que é a tensão ( $V_{forno}$ ) pela bobina do forno ativa com um circuito de bobina de forno capacitiva da

presente invenção. A tensão de forno resultante,  $V_{\text{forno}}$ , com um menor ângulo de fator de potência de retardamento  $\phi$  (ângulo anti-horário entre o eixo-x e o vetor OC), do que o forno convencional representado pelo vetor OB (mostrado em linhas tracejadas). Conforme ilustrado na figura 10, existe uma melhoria no ângulo do fator de potência de  $\Delta\phi$ .

[0051] Na presente invenção, a impedância indutiva da bobina passiva é substancialmente compensada pela impedância capacitiva (isto é,  $\omega L_2$ .  $1/\omega C_2$ ). O componente resistivo não-compensado,  $R_2$ , no circuito de bobina passivo é refletido no circuito de bobina ativa pela indutância mútua entre os dois circuitos, e a resistência dos circuitos da bobina ativa é aumentada, melhorando-se assim o ângulo do fator de potência, ou eficiência do sistema de bobina.

[0052] Além disso, o ângulo do fator de potência,  $\psi$ , da saída do inversor aumenta de  $\Delta\psi$ , conforme ilustrado pelo ângulo entre o vetor OJ (o vetor resultante ( $V'_{\text{inv}}$ ) do vetor componente resistivo OA e o vetor componente capacitivo AJ, na ausência de um circuito de bobina de forno passiva) e o vetor OD (o vetor resultante ( $V_{\text{inv}}$ ) do vetor componente resistivo HD, com o circuito de bobina de forno passivo da presente invenção).

[0053] Em um outro exemplo do sistema de bobina de alta frequência da presente invenção, conforme mostradas na figura 3(c), as bobinas  $L_1$  e  $L_2$  podem se sobrepor completa ou parcialmente para aumentar a indutância mútua  $M$  entre as duas bobinas.

[0054] Conforme mostrado na figura 4 para um exemplo da presente invenção, as bobinas  $L_1$  e  $L_2$  têm duas frequências ressonantes distintas a aproximadamente 144 Hertz e 166 Hertz, respectivamente. As mesmas aproximações de frequência para ressonâncias das bobinas  $L_1$  e  $L_2$  ignora os deslocamentos de frequência menores para ressonância das duas bobinas que está mostrada na figura 4.

[0055] Na figura 4, a curva  $P1_n$  (mostrada em linha de eixo) ilustra a

magnitude de potência no circuito de bobina  $L_1$  e a curva  $P_{2n}$  (mostrada em linha tracejada) ilustra a magnitude da potência no circuito de bobina  $L_2$ . A curva  $P_{\Sigma n}$  (mostrada em linha cheia) representa a soma de potência nos circuitos da bobina  $L_1$  e da bobina  $L_2$ . O controle de potência pode ser obtido variando-se a frequência de saída ( $f_n$ ) do suprimento de potência entre cc e a frequência na qual a ressonância ocorre para a bobina  $L_1$  (neste exemplo, aproximadamente 144 Hertz)

[0056] A figura 5 mostra para um exemplo da presente invenção o efeito da frequência ( $f_n$ ) do suprimento de potência, na magnitude da impedância de carga ( $Z_n$ ), em ohms, nos terminais 1 e 2, conforme mostrado na figura 3(a) e figura 3(b).

[0057] A figura 6 mostra, para um exemplo da presente invenção, o efeito da frequência ( $f_n$ ) do suprimento de potência no fator de potência ( $Pf_n$ ) do circuito de carga nos terminais 1 e 2, conforme mostrado na figura 3(a) e na figura 3(b). A figura 6 ilustra o fator de potência de carga da bobina melhorada que pode ser conseguido em um exemplo da presente invenção, operando-se com o suprimento de potência em uma faixa abaixo da primeira frequência ressonante de aproximadamente 144 Hertz.

[0058] A figura 7 mostra para um exemplo da presente invenção o efeito da frequência ( $f_n$ ) do suprimento de potência na magnitude da reatância de carga ( $X_n$ ), em ohms, nos terminais 1 e 2, conforme mostrado na figura 3(a) e na figura 3(b).

[0059] A agitação eletromagnética no material fundido no cadinho pode ser ajustada, substituindo-se o capacitor  $C_2$  da reatância passiva por um capacitor que tem um valor diferente de reatância para alterar o ponto ressonante no circuito tanque L-C em paralelo formado pela bobina  $L_2$  e o capacitor  $C_2$ . Em algumas aplicações, em que o circuito tanque L-C fica localizado próximo à base do cadinho, o capacitor  $C_2$  é selecionado para minimizar a turbulência provocada pela agitação eletromagnética excessiva

próxima à base do cadinho para evitar remoção de material refratário do cadinho que fica assentado na base do material fundido e que o contamina. Alternativamente, o capacitor  $C_2$  pode ser um banco de capacitores ajustável, em que a capacitância do capacitor  $C_2$  pode ser facilmente ajustada.

[0060] A figura 8(a) e a figura 8(b) mostram um exemplo alternativo do sistema de forno de indução da presente invenção, em que o capacitor de sintonia  $C_2$  fica conectado por uma seção parcial,  $L_b$ , da bobina  $L$ , que fica conectada nos seus terminais extremos (1 e 2) à saída do suprimento de potência 20 na figura 8(a) ou no suprimento de potência 21 da figura 8(b). Neste exemplo, a bobina  $L$  funciona como um autotransformador com potência aplicada por toda a bobina. O circuito tanque L-C formado pela seção da bobina parcial  $L_b$  e o capacitor  $C_2$  melhora a eficiência global do circuito da bobina de indução.

[0061] A figura 9(a) e a figura 9(b) mostram um outro exemplo alternativo do sistema de forno de indução da presente invenção, em que o capacitor de sintonia  $C_2$  fica conectado pelos terminais de extremidade da bobina  $L$ , que tem uma seção parcial,  $L_b$ , conectada à saída do suprimento de potência 20 da figura 9(a) ou do suprimento de potência 21 da figura 9(b). Neste exemplo, a bobina  $L$  funciona como um autotransformador com potência aplicada por uma seção parcial de toda a bobina. O circuito tanque L-C formado pela bobina de indução  $L$  e o capacitor  $C_2$  melhora a eficiência global do circuito da bobina de indução.

[0062] A figura 11 ilustra um outro exemplo da presente invenção, em que o cadinho 90 compreende um material termicamente isolado de extremidade aberta envolto pelas bobinas de indução. Embora o cadinho 90 esteja mostrado na forma no geral cilíndrica, o cadinho de extremidade aberta pode ser de outra forma configurado, desde que ele permita que o material eletricamente condutor 92 passe pelo cadinho. O material eletricamente condutor pode ser, apesar de não se limitar a este, um tarugo que atravessa o

cadinho, por meio do que o tarugo é indutivamente aquecido ou fundido. O cadinho e o material eletricamente condutor pode ser orientado em outras direções além das mostradas na figura 11, por exemplo, horizontalmente, em vez de verticalmente. Neste exemplo, as bobinas, o capacitor em tanque L-C em paralelo e o suprimento de potência são similares aos da figura 3(a). Este cadinho de extremidade aberta pode ser usado com qualquer outro exemplo da presente invenção.

[0063] Outros arranjos de bobina ativa ou passiva estão no escopo da invenção divulgada. Por exemplo, tanto circuitos de bobina ativos e/ou passivos múltiplos podem ser utilizados em várias configurações com uma ou mais bobinas sobrepostas e/ou uma ou mais bobinas não-sobrepostas. Além disso, as bobinas ativa e passiva podem ser dispostas acima da bobina ativa.

[0064] Embora um tipo de suprimento de potência esteja mostrado nas figuras para uso com o sistema de bobina de alta eficiência da invenção, outras topologias de suprimento de potência, tais como suprimentos de potência que empregam técnicas de modulação pela largura de pulso, podem ser usados para tirar proveito do sistema de bobina do sistema de forno de indução da presente invenção.

[0065] Os exemplos da invenção incluem referência a componentes elétricos específicos. Técnicos habilitados podem praticar a invenção substituindo-se componentes que não são necessariamente do mesmo tipo, mas que venham criar as mesmas condições ou obter os resultados desejados da invenção. Por exemplo, componentes únicos podem ser substituídos por componentes múltiplos, ou vice-versa.

[0066] Os exemplos expostos não limitam o escopo da invenção divulgada. O escopo da invenção divulgada está a seguir apresentado nas reivindicações anexas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de forno de indução, compreendendo:

um cadinho (13);

uma bobina de indução ativa ( $L_1$ ) e uma bobina de indução passiva ( $L_2$ ) envolvendo o cadinho;

a bobina de indução passiva ( $L_2$ ) sendo conectada em paralelo com um capacitor ( $C_2$ ) para formar um circuito tanque L-C em paralelo; e

um suprimento de potência (20) com uma saída CA conectada nos terminais da bobina de indução ativa ( $L_1$ ) para alimentar uma primeira corrente alternada à bobina de indução ativa ( $L_1$ ),

o sistema de forno de indução caracterizado pelo fato de que a bobina de indução ativa ( $L_1$ ) e a bobina de indução passiva ( $L_2$ ) envolvem seções parciais do cadinho (13) em um arranjo não sobreposto para criar um acoplamento magnético entre as bobinas de indução ativa e passiva ( $L_1, L_2$ ) quando a primeira corrente alternada flui através da bobina de indução ativa ( $L_1$ ) para induzir uma segunda corrente alternada na bobina de indução passiva ( $L_2$ ) para aquecer e fundir indutivamente o material eletricamente condutor (12) colocado no cadinho (13).

2. Sistema de forno de indução, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a capacitância do capacitor ( $C_2$ ) é ajustada para alterar as características de agitação magnética do segundo campo magnético.

3. Sistema de forno de indução, de acordo a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que o cadinho (13) é um material termicamente isolado de extremidade aberta.

4. Sistema de forno de indução, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o material eletricamente condutor (12) compreende um tarugo.

5. Sistema de forno de indução, de acordo com qualquer uma

das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que as extremidades adjacentes das bobinas ativa e passiva ( $L_1$ ,  $L_2$ ) são eletricamente conectadas.

6. Método de fundir e aquecer indutivamente um material eletricamente condutor (12) em um cadinho (13), compreendendo:

envolver o cadinho (13) com uma bobina de indução ativa ( $L_1$ ) e uma bobina de indução passiva ( $L_2$ );

conectar um capacitor ( $C_2$ ) aos terminais da bobina de indução passiva ( $L_2$ ) para formar um circuito tanque L-C em paralelo; e

fornecer uma primeira corrente alternada à bobina de indução ativa ( $L_1$ ) para gerar um primeiro campo magnético para fundir e aquecer indutivamente o material eletricamente condutor (12),

o método caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

dispor a bobina de indução ativa ( $L_1$ ) e a bobina de indução passiva ( $L_2$ ) em um arranjo não sobreposto para criar um acoplamento magnético entre as bobinas de indução ativas e passivas ( $L_1$ ,  $L_2$ ) quando a primeira corrente alternada flui através da bobina de indução ativa para induzir uma segunda corrente alternada na bobina de indução passiva ( $L_2$ ) para gerar um segundo campo magnético na bobina de indução passiva ( $L_2$ ) para aquecer e fundir indutivamente o material eletricamente condutor (12).

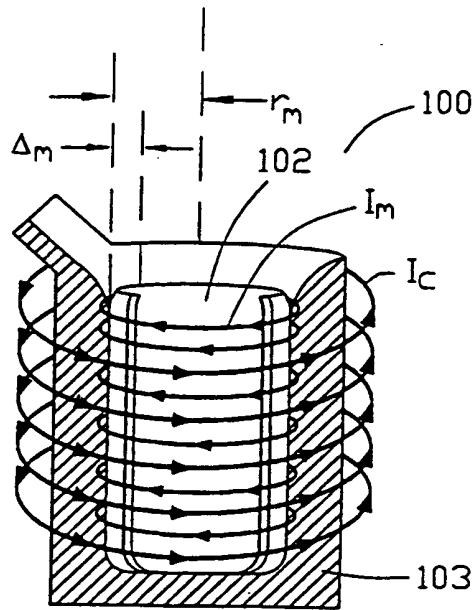
7. Método, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que compreende a etapa de ajustar a capacitância do capacitor ( $C_2$ ), por meio do que as características de agitação magnética do segundo campo magnético são alteradas.

8. Método, de acordo com a reivindicação 6 ou 7, caracterizado pelo fato de que compreende a etapa de passar o material eletricamente condutor (12) pelo cadinho (13).

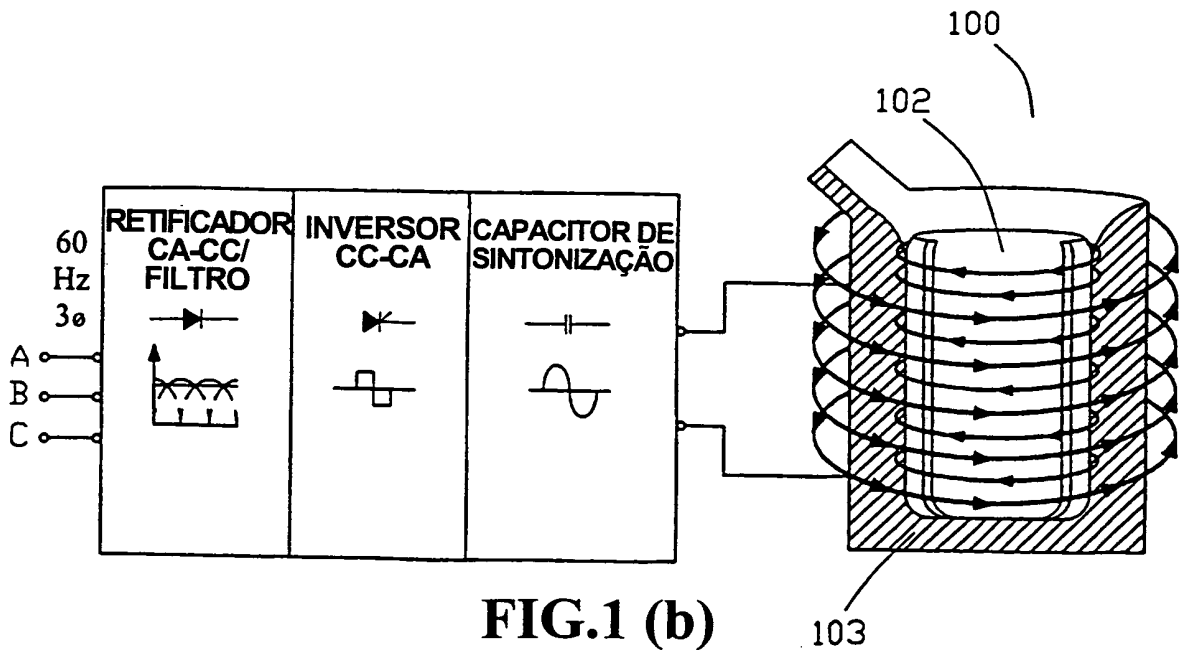
9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 8, caracterizado pelo fato de que compreende a etapa de conectar

eletricamente extremidades adjacentes da bobina de indução passiva ( $L_2$ ) e da bobina de indução ativa ( $L_1$ ).

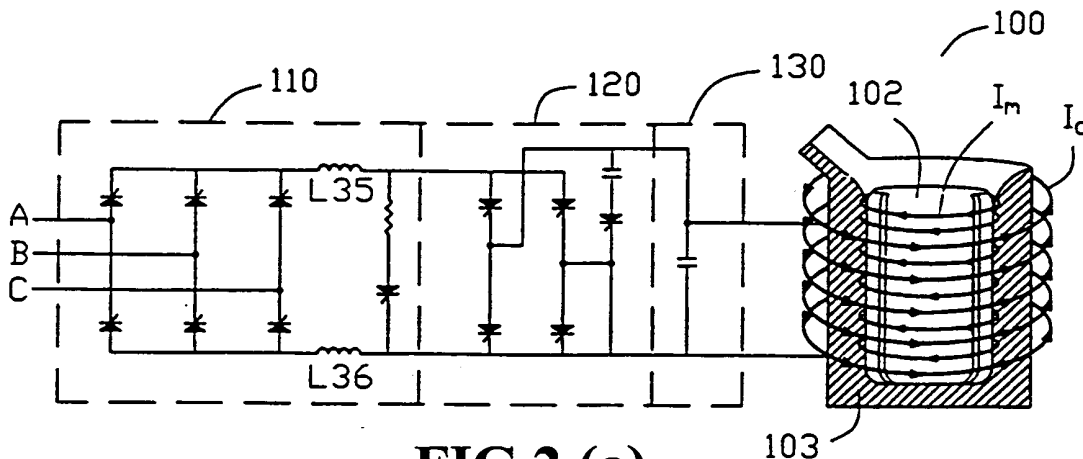
*Handwritten signature*



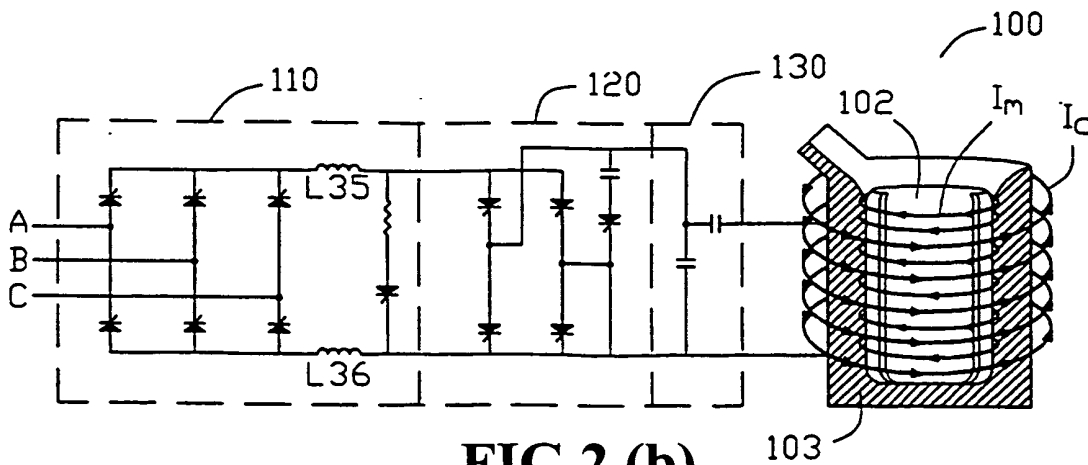
**FIG.1 (a)**  
TÉCNICA ANTERIOR



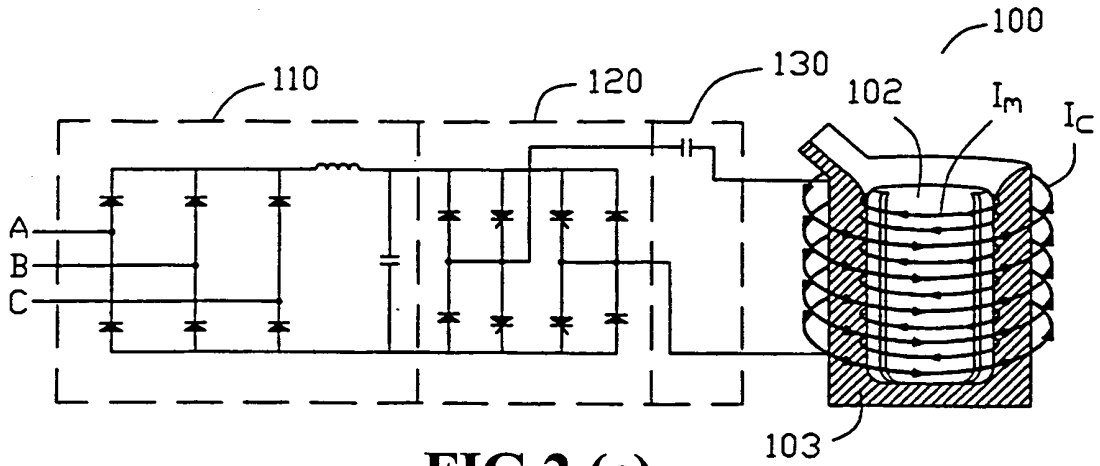
**FIG.1 (b)**  
TÉCNICA ANTERIOR



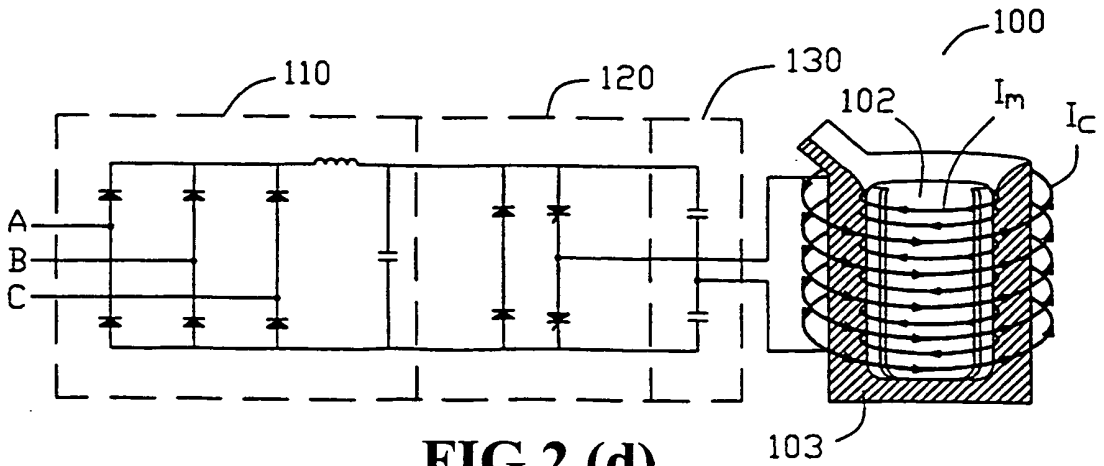
**FIG.2 (a)**  
TÉCNICA ANTERIOR



**FIG.2 (b)**  
TÉCNICA ANTERIOR



**FIG.2 (c)**  
**TÉCNICA ANTERIOR**



**FIG.2 (d)**  
**TÉCNICA ANTERIOR**

3 10000457

30

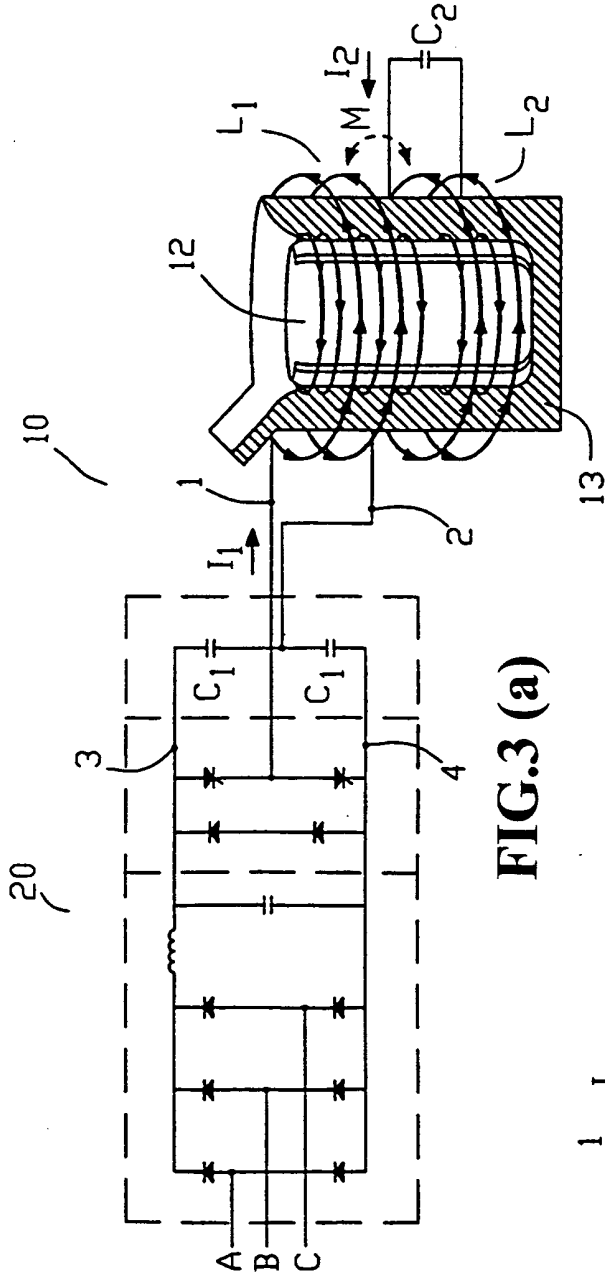


FIG. 3 (a)

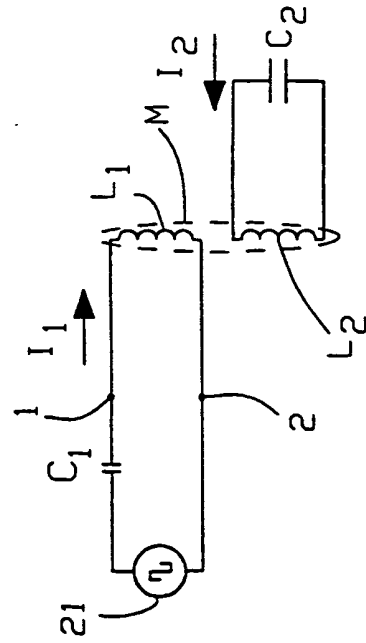


FIG. 3 (b)

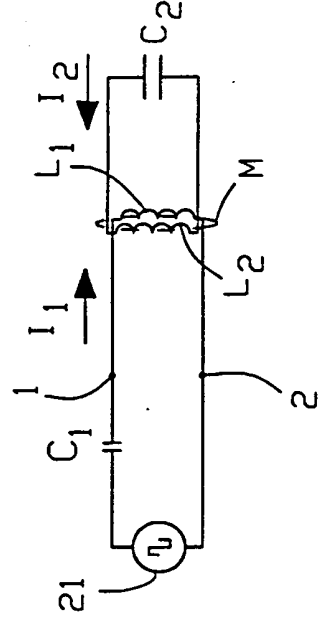


FIG. 3 (c)

BA  
A

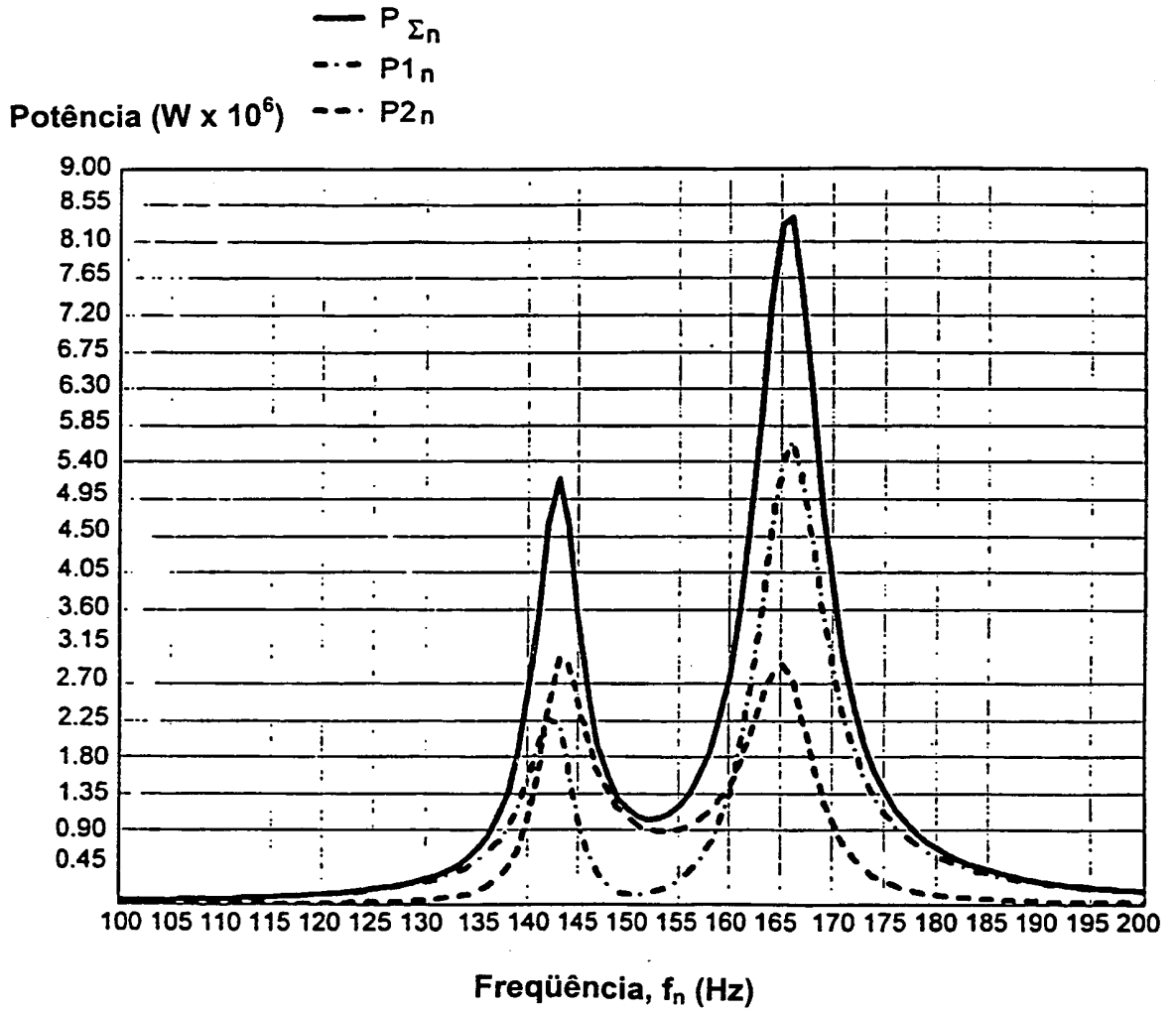


FIG.4

Impedância,  $Z_n$ (ohms)

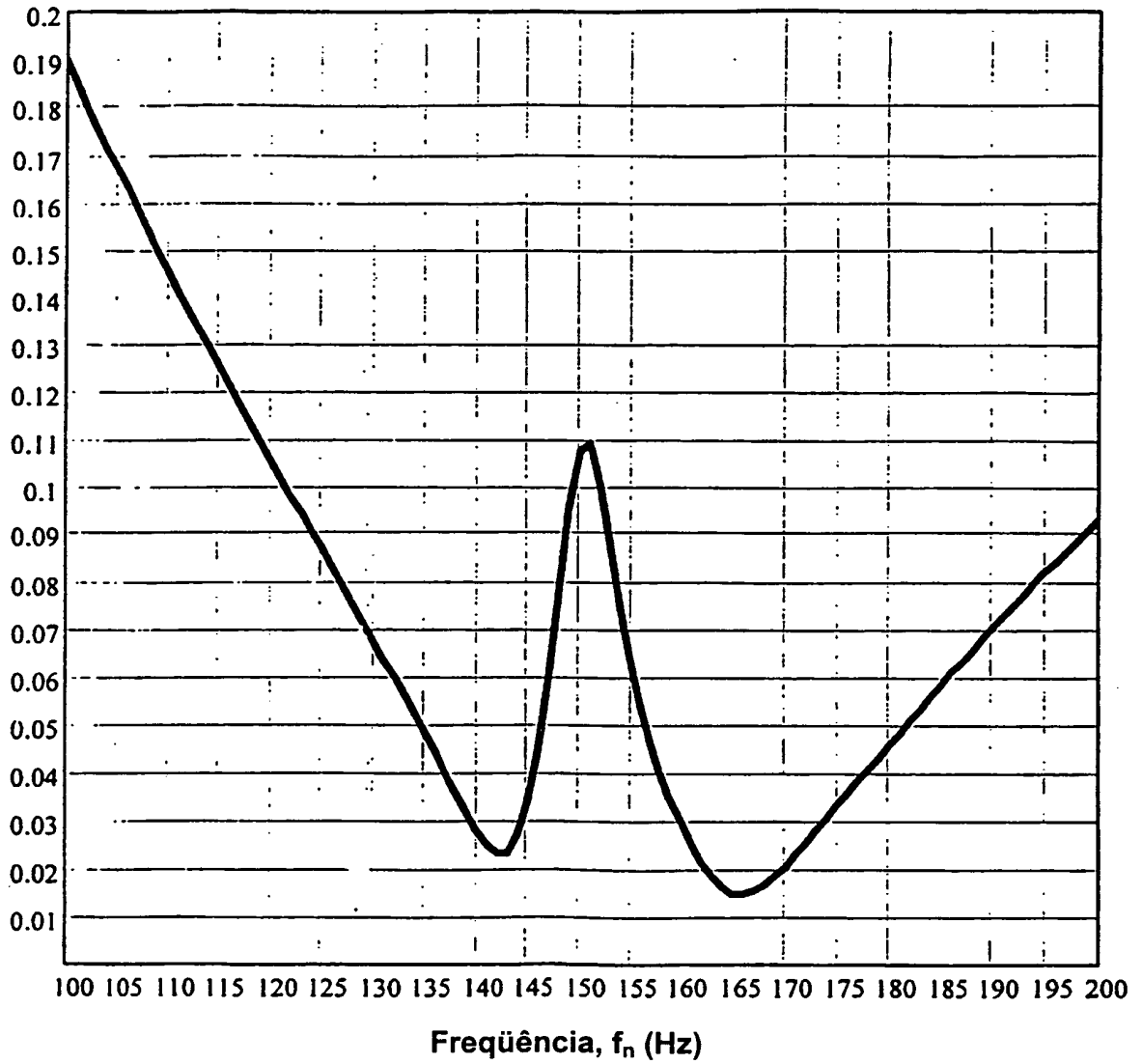
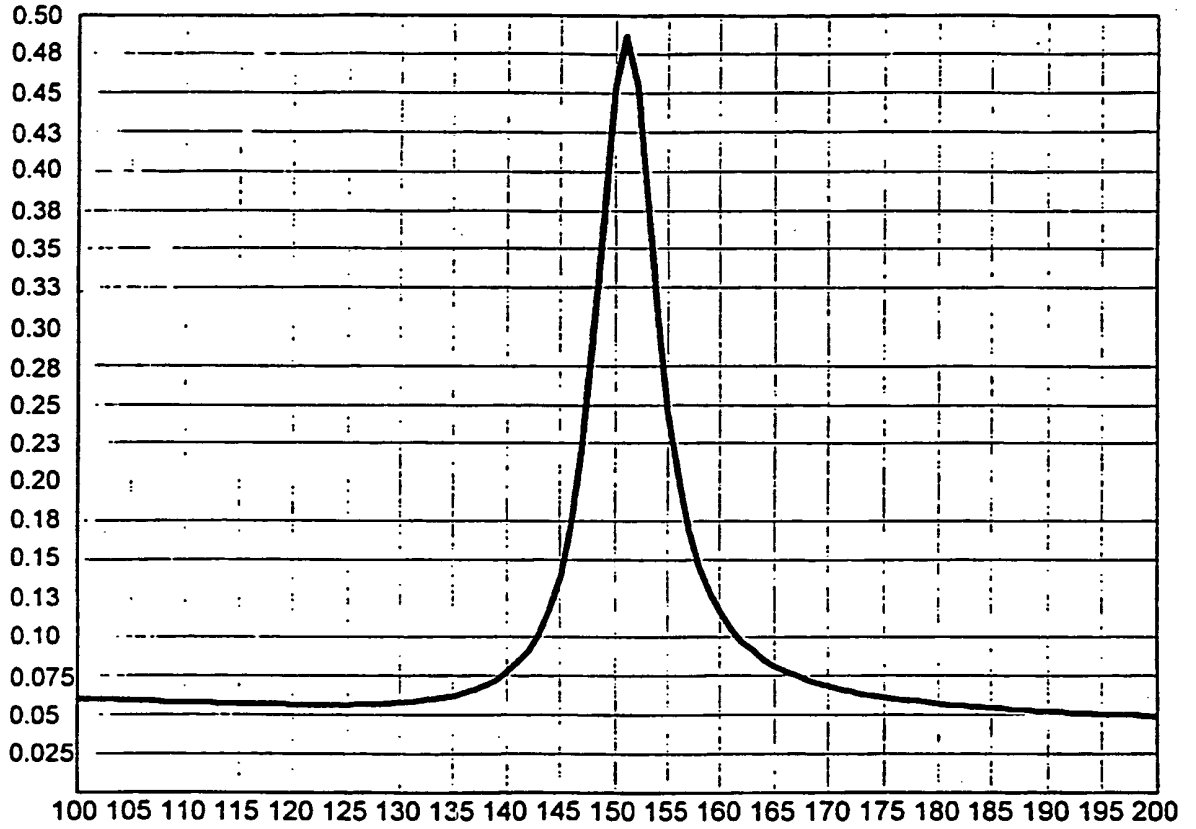


FIG.5

Fator de potência da bobina,  $Pf_n$



Frequência,  $f_n$  (Hz)

FIG.6

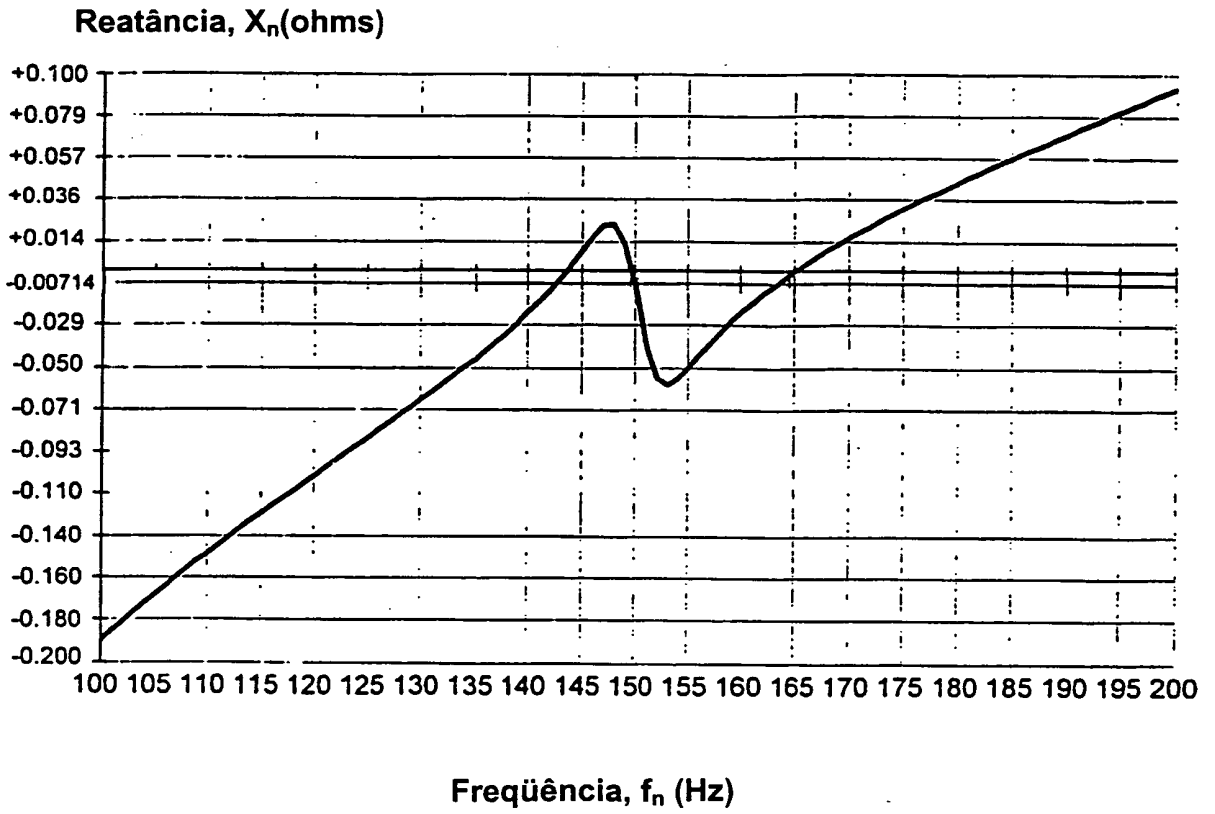


FIG.7

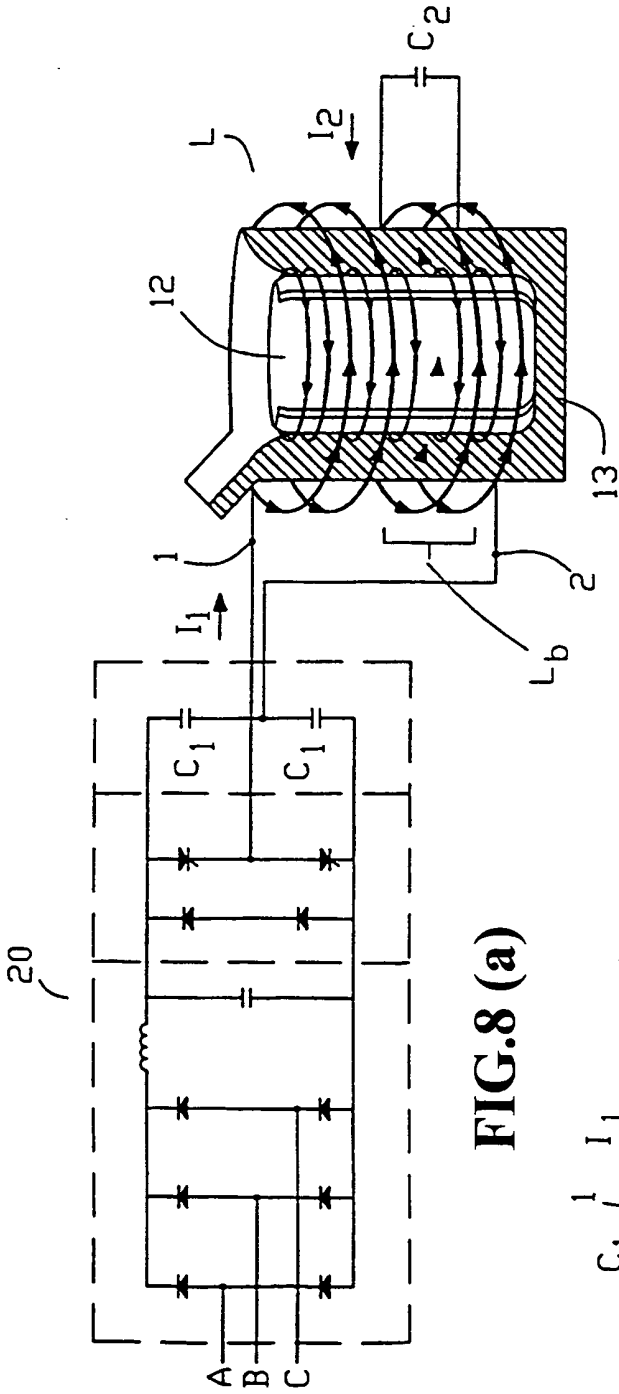


FIG. 8 (a)

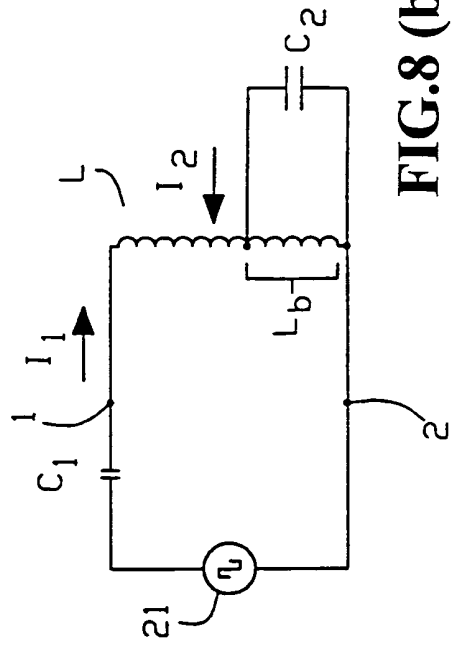


FIG. 8 (b)

36

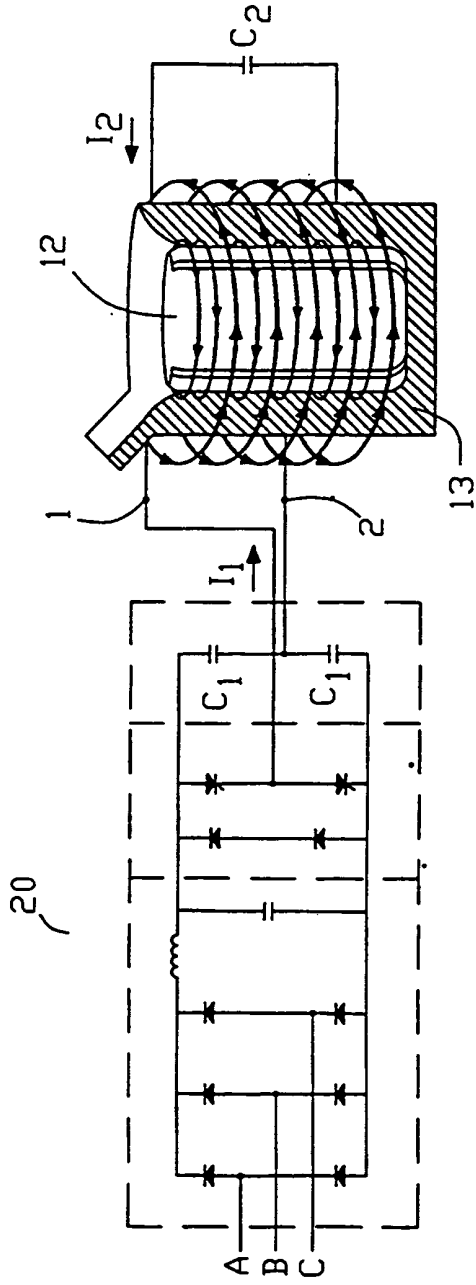


FIG.9 (a)

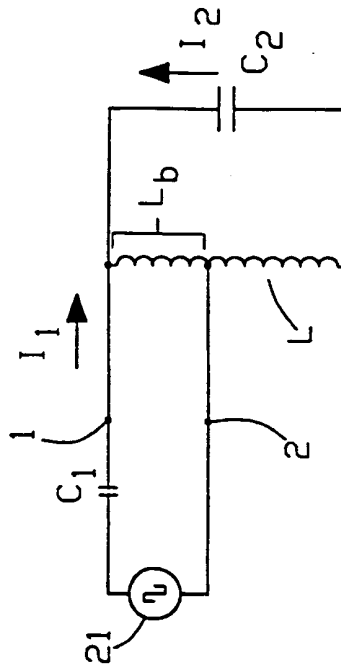


FIG.9 (b)

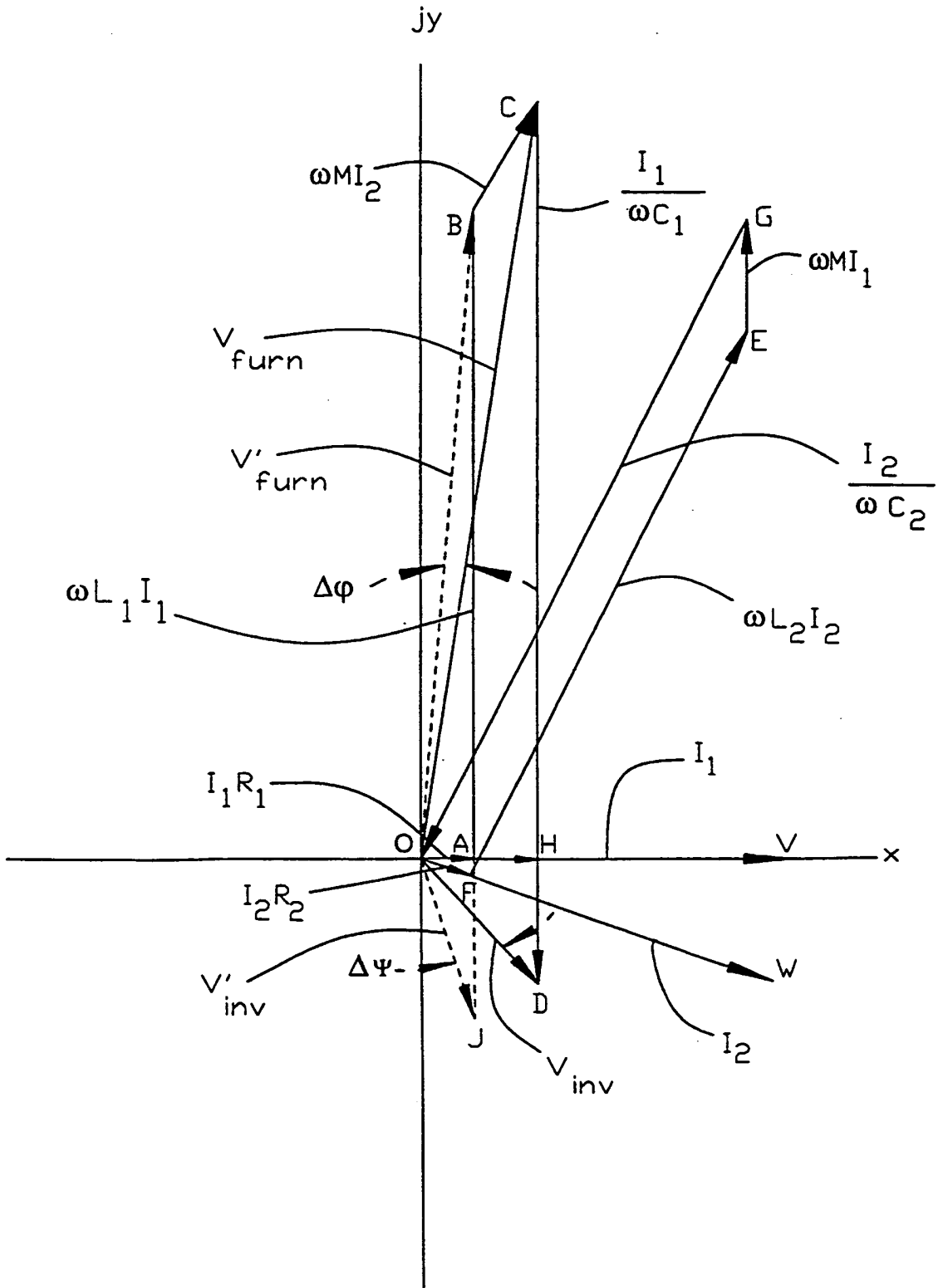


FIG.10

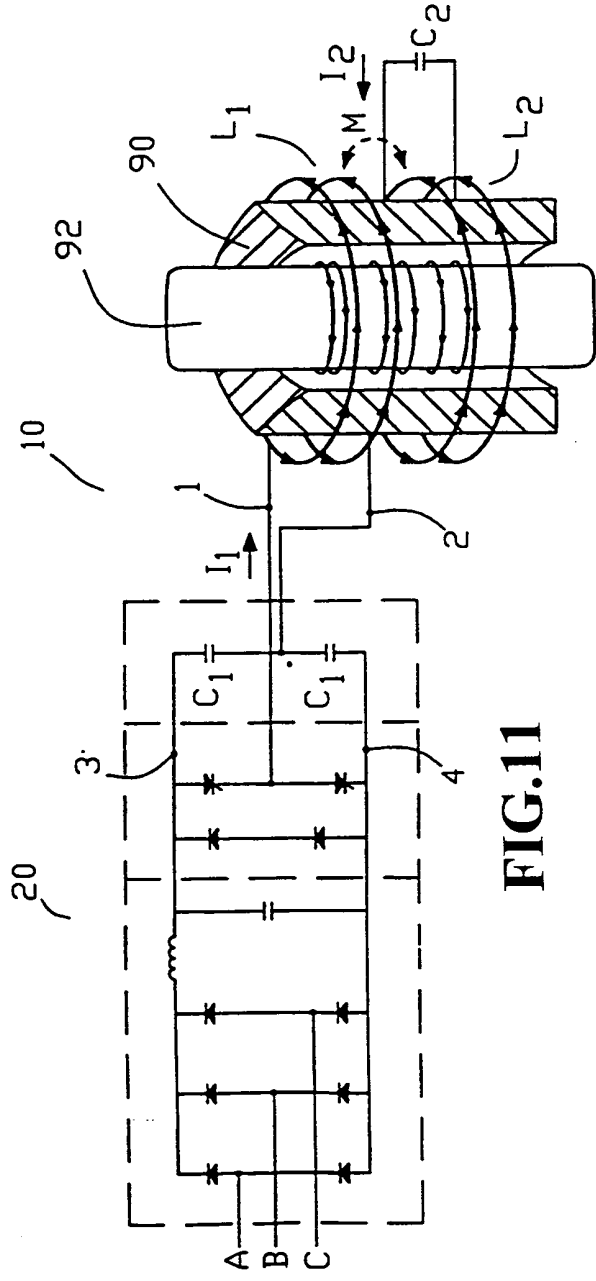


FIG.11