

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6704523号
(P6704523)

(45) 発行日 令和2年6月3日(2020.6.3)

(24) 登録日 令和2年5月14日(2020.5.14)

(51) Int. Cl. F 1
 HO 2 P 1/46 (2006.01) HO 2 P 1/46
 HO 2 P 9/08 (2006.01) HO 2 P 9/08 A

請求項の数 8 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2019-524771 (P2019-524771)	(73) 特許権者	501137636 東芝三菱電機産業システム株式会社 東京都中央区京橋三丁目1番1号
(86) (22) 出願日	平成29年6月21日(2017.6.21)	(73) 特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/022844	(74) 代理人	110001195 特許業務法人深見特許事務所
(87) 国際公開番号	W02018/235189	(72) 発明者	松本 泰明 東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内
(87) 国際公開日	平成30年12月27日(2018.12.27)	(72) 発明者	荻野 宏之 東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内
審査請求日	令和1年7月3日(2019.7.3)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 サイリスタ起動装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

界磁巻線を有する回転子と固定子とを有する同期機を起動させるサイリスタ起動装置であって、

交流電力を直流電力に変換するように構成されたコンバータと、

前記直流電力を平滑化する直流リアクトルと、

前記コンバータから前記直流リアクトルを介して与えられる直流電力を可変周波数の交流電力に変換して前記固定子に供給するように構成されたインバータと、

前記界磁巻線に界磁電流を供給するように構成された励磁装置とを備え、

前記サイリスタ起動装置は、前記コンバータの直流出力電流を断続的に零にすることにより前記インバータの転流を行なう第1のモードと、前記同期機の誘起電圧により前記インバータの転流を行なう第2のモードとを順次実行することにより、前記同期機を停止状態から所定の回転速度まで加速させるように構成され、

前記サイリスタ起動装置は、さらに、前記第1のモードにおいて、前記界磁電流を一定とすることにより前記同期機の回転速度と比例的に前記誘起電圧を上昇させるとともに、前記誘起電圧が第1の電圧値に達した後は、前記界磁電流を低下させることにより前記誘起電圧の上昇を抑制するように構成される、サイリスタ起動装置。

【請求項2】

前記サイリスタ起動装置は、前記誘起電圧が前記第1の電圧値に達した後は、前記同期機の回転速度に応じて前記界磁電流を低下させることにより前記誘起電圧を前記第1の電

10

20

圧値に保つように構成される、請求項 1 に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 3】

前記第 2 のモードにおいて、前記励磁装置は、前記界磁電流を一定とすることにより前記誘起電圧を前記第 1 の電圧値からさらに増加させ、かつ、前記誘起電圧が前記第 1 の電圧値よりも高い第 2 の電圧値に達した後は、前記同期機の回転速度に応じて前記界磁電流を低下させることにより前記誘起電圧を一定に保つように構成される、請求項 1 または 2 に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 4】

前記同期機の前記回転子の位置を検出する位置検出器と、

前記位置検出器の検出信号に基づいて、前記インバータにおけるサイリスタの点弧位相を制御するように構成された第 1 の制御部と、

前記位置検出器の検出信号に基づいて、前記コンバータの直流出力電流が電流指令値に一致するように、前記コンバータにおけるサイリスタの点弧位相を制御するように構成された第 2 の制御部とをさらに備え、

前記第 1 のモードにおいて、前記誘起電圧が前記第 1 の電圧値となる回転速度における前記電流指令値は、前記誘起電圧が前記第 1 の電圧値よりも低くなる回転速度における前記電流指令値よりも大きい電流値に設定される、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 5】

前記誘起電圧が前記第 1 の電圧値となる回転速度範囲において、前記電流指令値は、前記同期機の回転速度が高くなるに従って電流値が大きくなるように設定される、請求項 4 に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 6】

前記同期機の回転速度が前記回転速度範囲にあるときには、前記電流指令値は、前記同期機の回転速度に応じて離散的に変化する、請求項 5 に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 7】

前記同期機の回転速度が前記回転速度範囲にあるときには、前記電流指令値は、前記同期機の回転速度に応じて連続的に変化する、請求項 5 に記載のサイリスタ起動装置。

【請求項 8】

前記同期機は、前記回転子の回転軸に取り付けられ、前記固定子および前記回転子に形成された通風路に冷却媒体を循環させるように構成されたファンをさらに含む、請求項 5 ~ 7 のいずれか 1 項に記載のサイリスタ起動装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、サイリスタ起動装置に関する。

【背景技術】

【0002】

発電機および電動機等の同期機を起動するためのサイリスタ起動装置が開発されている（たとえば国際公開 2014/033849 号明細書（特許文献 1）参照）。サイリスタ起動装置は、交流電力を直流電力に変換するコンバータと、直流電力を平滑化する直流リアクトルと、コンバータから直流リアクトルを介して与えられる直流電力を可変周波数の交流電力に変換して同期機に供給するインバータとを備えている。同期機に供給する交流電力を制御することにより、停止状態の同期機を起動させて所定の回転速度で駆動させることができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】国際公開 2014/033849 号明細書

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

上記サイリスタ起動装置において、インバータは少なくとも6個のサイリスタを有している。同期機の回転に同期して6個のサイリスタを2個ずつ順序良く点弧させることにより、インバータは同期機に三相交流電力を供給して同期機の回転速度を上昇させることができる。

【0005】

しかしながら、インバータの転流動作中に6個のサイリスタのうちのいずれかのサイリスタにおいて短絡故障が発生した場合、別の健全なサイリスタを点弧させることで、このサイリスタを通じて事故電流が流れる経路が形成される。そのため、事故電流によって健全なサイリスタおよび電機子巻線などの構成部品がダメージを受けることとなる。事故電流が大きくなるほど、構成部品へのダメージも大きくなるため、構成部品が損傷する可能性が高くなる。

【0006】

この発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、その目的は、事故電流による損傷を抑制することができるサイリスタ起動装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

この発明のある局面によれば、サイリスタ起動装置は、界磁巻線を有する回転子と固定子とを有する同期機を起動させる。サイリスタ起動装置は、コンバータと、直流リアクトルと、インバータと、励磁装置とを備える。コンバータは、交流電力を直流電力に変換するように構成される。直流リアクトルは直流電力を平滑化する。インバータは、コンバータから直流リアクトルを介して与えられる直流電力を可変周波数の交流電力に変換して固定子に供給するように構成される。励磁装置は、界磁巻線に界磁電流を供給するように構成される。サイリスタ起動装置は、コンバータの直流出力電流を断続的に零にすることによりインバータの転流を行なう第1のモードと、同期機の誘起電圧によりインバータの転流を行なう第2のモードとを順次実行することにより、同期機を停止状態から所定の回転速度まで加速させるように構成される。サイリスタ起動装置は、さらに、第1のモードにおいて、界磁電流を一定とすることにより同期機の回転速度と比例的に誘起電圧を上昇させるとともに、誘起電圧が第1の電圧値に達した後は、界磁電流を低下させることにより誘起電圧の上昇を抑制するように構成される。

【発明の効果】

【0008】

この発明によると、事故電流による損傷を抑制することができるサイリスタ起動装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】この発明の実施の形態1によるサイリスタ起動装置の構成を示す回路ブロック図である。

【図2】サイリスタ起動装置の基本動作を示すタイムチャートである。

【図3】図1に示したインバータの構成および動作を示す回路図である。

【図4】負荷転流モード時におけるインバータの理想的な転流動作を模式的に示すタイムチャートである。

【図5】事故電流の経路を説明するための回路図である。

【図6】図5に示した事故電流の経路を模式的に示す等価回路図である。

【図7】線間電圧および事故電流の動作波形を示す図である。

【図8】実施の形態1によるサイリスタ起動装置の動作を示すタイムチャートである。

【図9】断続転流モード時の同期機の回転速度とコンバータから出力される直流電流との関係を模式的に示すタイムチャートである。

【図10】断続転流モード時の同期機の回転速度と電流指令値との関係を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 1 1】同期機の冷却構造の一例を示す断面図である。

【図 1 2】断続転流モード時の同期機の回転速度とコンバータから出力される直流電流との関係を模式的に示すタイムチャートである。

【図 1 3】断続転流モード時の同期機の回転速度と電流指令値との関係の一例を示す図である。

【図 1 4】断続転流モード時の同期機の回転速度と電流指令値との関係の他の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、この発明の実施の形態について図面を参照して詳しく説明する。なお、同一または相当する部分には同一の参照符号を付して、その説明を繰返さない。

10

【0011】

[実施の形態 1]

図 1 は、この発明の実施の形態 1 によるサイリスタ起動装置の構成を示す回路ブロック図である。図 1 を参照して、この発明の実施の形態 1 によるサイリスタ起動装置 100 は、停止している同期機 20 を所定の回転速度まで加速させることにより、同期機 20 を起動させる。

【0012】

同期機 20 は、電機子巻線 A T U , A T V , A T W を有する固定子と、界磁巻線 22 を有する回転子とを含む。同期機 20 は、たとえば火力発電所のガスタービンに結合されており、ガスタービンによって回転駆動される。以下の説明では、所定の回転速度を「定格回転速度」とも称する。たとえば、交流電源 30 の周波数が 60 Hz である場合、定格回転速度は 3600 rpm に設定される。

20

【0013】

サイリスタ起動装置 100 は、変圧器 T R の二次側に接続されている。変圧器 T R の一次側は交流電源 30 に接続されている。変圧器 T R は、交流電源 30 から供給される三相交流電圧を所定の電圧値の三相交流電圧に変換してサイリスタ起動装置 100 に与える。

【0014】

サイリスタ起動装置 100 は、コンバータ 1、直流リアクトル 3、インバータ 2、および励磁装置 21 を備える。コンバータ 1 は、少なくとも 6 個のサイリスタを含む三相全波整流器であり、変圧器 T R からの三相交流電力を可変電圧の直流電力に変換する。

30

【0015】

直流リアクトル 3 は、コンバータ 1 の正側出力端子 1 a とインバータ 2 の正側入力端子 2 a との間に接続される。直流リアクトル 3 は、コンバータ 1 の直流出力電流 I_d を平滑化する。コンバータ 1 の負側出力端子 1 b とインバータ 2 の負側入力端子 2 b とは互いに接続される。なお、もう一つの直流リアクトル 3 が、コンバータ 1 の負側出力端子 1 b とインバータ 2 の負側入力端子 2 b との間に接続されていてもよい。

【0016】

インバータ 2 の 3 つの出力端子 2 c , 2 d , 2 e は、それぞれ、同期機 20 の 3 つの電機子巻線 A T U , A T V , A T W に接続される。インバータ 2 は、少なくとも 6 個のサイリスタ U , V , W , X , Y , Z を含む三相他励式インバータである。インバータ 2 は、コンバータ 1 から直流リアクトル 3 を介して与えられた直流電力を可変周波数の交流電力に変換して同期機 20 に供給する。

40

【0017】

励磁装置 21 は、同期機 20 の界磁巻線 22 に界磁電流 I_f を供給する。界磁巻線 22 に界磁電流 I_f が供給されている状態において、インバータ 2 から電機子巻線 A T U , A T V , A T W に交流電力を供給することにより、同期機 20 の回転が加速される。

【0018】

サイリスタ起動装置 100 は、変流器 4 , 5、電圧検出器 6、位置検出器 7、電流検出器 9、インバータ制御部 10、およびコンバータ制御部 13 をさらに備える。

50

【 0 0 1 9 】

変流器 4 は、変圧器 T R からコンバータ 1 に流れる三相交流電流を検出し、検出値を示す信号を電流検出器 9 に与える。電流検出器 9 は、変流器 4 からの信号に基づいて、コンバータ 1 から出力される直流電流 I_d を演算し、その演算値を示す信号をコンバータ制御部 1 3 に与える。具体的には、電流検出器 9 は、全波整流型のダイオード整流器を有しており、検出された三相交流電流を直流電流 I_d に変換する。

【 0 0 2 0 】

変流器 5 は、インバータ 2 から同期機 2 0 の電機子巻線 A T U , A T V , A T W に流れる電流を検出し、検出値を示す信号を位置検出器 7 に与える。

【 0 0 2 1 】

電圧検出器 6 は、インバータ 2 から同期機 2 0 に供給される三相交流電圧 V_u , V_v , V_w の瞬時値を検出し、検出値を示す信号を位置検出器 7 に与える。具体的には、電圧検出器 6 は、同期機 2 0 の電機子巻線 A T U , A T V , A T W における三相交流電圧の線間電圧のうち 2 つの線間電圧 (図 1 では、U 相 - V 相間の交流電圧 $V_u - v$ および V 相 - W 相間の交流電圧 $V_v - w$ とする) を検出する。このように、U 相 - V 相間の交流電圧 $V_u - v$ 、 V 相 - W 相間の交流電圧 $V_v - w$ および W 相 - U 相間の交流電圧 $V_w - u$ のうちの少なくとも 2 つの線間電圧を検出することにより、U 相、V 相、W 相の交流電圧を計算により求めることができる。この線間電圧から相電圧への変換は、電圧検出器 6 または位置検出器 7 において行なわれる。

【 0 0 2 2 】

位置検出器 7 は、変流器 5 および電圧検出器 6 からの信号に基づいて同期機 2 0 の回転子の位置を検出し、検出値を示す信号をインバータ制御部 1 0 およびコンバータ制御部 1 3 に与える。

【 0 0 2 3 】

インバータ制御部 1 0 は、位置検出器 7 からの信号に基づいて、インバータ 2 の点弧位相を制御する。具体的には、インバータ制御部 1 0 は、制御角演算部 1 1 と、ゲートパルス発生器 1 2 とを含む。制御角演算部 1 1 は、検出された同期機 2 0 の回転子の位置に基づいて位相制御角 (点弧角) を演算し、演算した位相制御角 をゲートパルス発生器 1 2 に与える。ゲートパルス発生回路 4 0 は、制御角演算部 1 1 から受けた位相制御角 に基づいてインバータ 2 のサイリスタのゲートに与えるゲートパルス (点弧指令) を生成する。インバータ制御部 1 0 は「第 1 の制御部」の一実施例に対応する。

【 0 0 2 4 】

コンバータ制御部 1 3 は、位置検出器 7 からの信号および電流検出器 9 からの信号に基づいて、コンバータ 1 の点弧位相を制御する。具体的には、コンバータ制御部 1 3 は、コンバータ 1 から出力される直流電流 I_d が電流指令値 I_d^* に一致するように、コンバータ 1 の点弧位相を制御する。コンバータ制御部 1 3 は「第 2 の制御部」の一実施例に対応する。

【 0 0 2 5 】

コンバータ制御部 1 3 は、速度制御部 1 4 と、電流制御部 1 5 と、制御角演算部 1 6 と、ゲートパルス発生器 1 7 とを含む。速度制御部 1 4 は、検出された同期機 2 0 の回転子の位置に基づいて、同期機 2 0 の回転速度を演算する。速度制御部 1 4 は、演算した回転速度に基づいて、直流電流 I_d の目標値である電流指令値 I_d^* を生成する。

【 0 0 2 6 】

電流制御部 1 5 は、電流指令値 I_d^* と直流電流 I_d との偏差 I_d を演算し、演算した偏差 I_d に基づいて電圧指令値 V_{DC1}^* を生成する。具体的には、電流制御部 1 5 は、比例要素 (P : proportional element)、積分要素 (I : integral element) および加算部を含む。比例要素が偏差 I_d に所定の比例ゲインを乗じて加算部へ出力し、積分要素は偏差 I_d を所定の積分ゲインで積分して加算部へ出力する。加算部は、比例要素および積分要素からの出力を加算して電圧指令値 V_{DC1}^* を生成する。電圧指令値 V_{DC1}^* は、コンバータ 1 が出力すべき直流電圧 V_{DC1} を規定する制御指令に相当する

10

20

30

40

50

。

【 0 0 2 7 】

なお、コンバータ 1 は、インバータ 2 の入力端子側の直流電圧 $VDC2$ よりも直流リアクトル 3 による電圧降下分だけ大きくなるように直流電圧 $VDC1$ を制御する。これにより、直流電流 I_d が制御される。

【 0 0 2 8 】

制御角演算部 16 は、電流制御部 15 から与えられる電圧指令値 $VDC1^*$ に基づいて、位相制御角 を演算する。制御角演算部 16 は、演算した位相制御角 をゲートパルス発生器 17 に与える。

【 0 0 2 9 】

ゲートパルス発生回路 40 は、制御角演算部 16 から受けた位相制御角 に基づいてコンバータ 1 のサイリスタのゲートに与えるゲートパルス（点弧指令）を生成する。ゲートパルス発生器 17 によって生成されたゲートパルスに従ってコンバータ 1 がスイッチング制御されることにより、電流指令値 I_d^* に従った直流電流 I_d がコンバータ 1 から出力される。

【 0 0 3 0 】

次に、図 2 を用いて、サイリスタ起動装置 100 の基本動作について説明する。

図 2 は、サイリスタ起動装置 100 の基本動作を示すタイムチャートである。図 2 には、同期機 20 の回転速度、同期機 20 に発生する誘起電圧の実効値、コンバータ 1 から出力される直流電流 I_d 、および界磁電流 I_f が示されている。

【 0 0 3 1 】

サイリスタ起動装置 100 においては、同期機 20 の電機子巻線 ATU 、 ATV 、 ATW に発生する誘起電圧を利用してインバータ 2 におけるサイリスタの転流が行なわれる。このような転流は「負荷転流」と呼ばれている。

【 0 0 3 2 】

しかしながら、同期機 20 の回転速度が低い場合、すなわち同期機 20 の起動時や低速時には、電機子巻線 ATU 、 ATV 、 ATW に発生する誘起電圧が低いため、サイリスタの転流が失敗する場合がある。そのため、同期機 20 の回転速度が低いときには、コンバータ 1 の直流出力電流 I_d を断続的に零にしてインバータ 2 の転流を行なう「断続転流」が採用されている。

【 0 0 3 3 】

図 2 に示すように、サイリスタ起動装置 100 は、断続転流モード（第 1 のモード）と負荷転流モード（第 2 のモード）とを順次切り替えて実行することにより、同期機 20 を停止状態から定格回転速度まで加速させるように構成される。

【 0 0 3 4 】

具体的には、時刻 $t = 0$ にて停止状態の同期機 20 を起動させると、サイリスタ起動装置 100 は断続転流モードを実行する。断続転流モード時、直流電流 I_d はパルス波形を示している。各パルスの波高値は、通常、一定値とされる（ $I_d = I_0$ ）。波高値は、たとえば、断続転流モードの期間中に同期機 20 に供給される交流電力の積算値が、停止状態の同期機 20 を切り替え回転速度まで加速させるための電力量を満たすように設定される。

【 0 0 3 5 】

そして、同期機 20 の回転速度が定格回転速度の 10% 程度に到達すると、サイリスタ起動装置 100 は、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わる。以下の説明では、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わる時の回転速度を「切り替え回転速度」とも称する。図 2 の例では、切り替え回転速度を定格回転速度の 10% 程度としている。

【 0 0 3 6 】

励磁装置 21 は、時刻 $t = 0$ において停止状態の同期機 20 を起動させると、界磁巻線 22 に一定の界磁電流 I_f を供給する（ $I_f = I_{f0}$ ）。一定の界磁電流 I_f により回転子には一定の界磁磁束が発生する。この状態で同期機 20 を加速させることにより、同期

10

20

30

40

50

機 20 に発生する誘起電圧の大きさ（実効値）は同期機 20 の回転速度と比例的に変化する。

【 0037 】

同期機 20 に発生する誘起電圧の実効値が所定の電圧 $V_E 2$ に達すると、励磁装置 21 は界磁巻線 22 に供給する界磁電流 I_f を低下させる。これにより、誘起電圧の実効値は回転速度が変わっても一定の電圧 V_E に保たれる。

【 0038 】

図 3 は、図 1 に示したインバータ 2 の構成および動作を示す回路図である。図 3 を参照して、サイリスタ U, V, W のアノードはともに正側入力端子 2a に接続され、それらのカソードはそれぞれ出力端子 2c, 2d, 2e に接続される。サイリスタ X, Y, Z のアノードはそれぞれ出力端子 2c, 2d, 2e に接続され、それらのカソードはともに負側入力端子 2b に接続される。

10

【 0039 】

三相交流電圧 V_u, V_v, V_w に同期して、サイリスタ U, V, W のうちの 1 つのサイリスタと、サイリスタ X, Y, Z のうちの 1 つのサイリスタとを導通させることにより、インバータ 2 は、コンバータ 1 から直流リアクトル 3 を介して供給される直流電力を可変周波数、可変電圧の三相交流電力に変換して同期機 20 の固定子（電機子巻線 $A_T U, A_T V, A_T W$ ）に与える。これにより、同期機 20 の回転速度を上昇させることができる。

【 0040 】

20

たとえば、図 3 に示すように、サイリスタ U, Z が導通している場合は、同期機 20 の U 相電圧 V_u がインダクタンス L_u およびサイリスタ U を介してインバータ 2 の入力端子 2a に現れ、 W 相電圧 V_w がインダクタンス L_w およびサイリスタ Z を介してインバータ 2 の入力端子 2b に現れる。すなわち、同期機 20 の W 相 - U 相間の交流電圧 $V_w - u$ が直流電圧 $V_{DC} 2$ となって入力端子 2a, 2b 間に現れる。なお、リアクトル L_u, L_v, L_w はそれぞれ、同期機 20 の電機子巻線 $A_T U, A_T V, A_T W$ が有するインダクタンスを表している。

【 0041 】

図 4 は、負荷転流モード時におけるインバータ 2 の理想的な転流動作を模式的に示すタイムチャートである。図 4 では、三相交流電圧 V_u, V_v, V_w 、インバータ 2 の 6 個のサイリスタのうちの導通しているサイリスタ、およびインバータ 2 の入力端子 2a, 2b 間に現れる直流電圧 $V_{DC} 2$ を示している。

30

【 0042 】

図 4 において、線間電圧 $V_u - v, V_v - w, V_w - u$ が 0 V となる点が位相制御角の基準点であり、基準点では $\theta = 0^\circ$ である。負荷転流モードでは、基準点から所望の角度だけ位相を進めた時刻でサイリスタにゲートパルスを与える。たとえば、サイリスタ U が導通している期間中にサイリスタ V にゲートパルスを与え、次にサイリスタ V が導通している期間中にサイリスタ W にゲートパルスを与える。同様に、サイリスタ Z が導通している期間中にサイリスタ X にゲートパルスを与え、次にサイリスタ X が導通している期間中にサイリスタ Y にゲートパルスを与える。

40

【 0043 】

導通するサイリスタの遷移に応じて、同期機 20 の線間電圧 $V_u - v, V_v - w, V_w - u$ がインバータ 2 の入力端子 2a, 2b 間に直流電圧 $V_{DC} 2$ として順次現れる。インバータ制御部 10 は、同期機 20 の回転に応じて、6 個のサイリスタ U, V, W, X, Y, Z を 2 個ずつ順序良く点弧させて同期機 20 に流れる電流の経路を制御する。

【 0044 】

ここで、負荷転流モード中にインバータ 2 の 6 個のサイリスタ U, V, W, X, Y, Z のうちのいずれかのサイリスタにおいて、アノード - カソード間が電氣的に短絡する短絡故障が発生した場合を考える。

【 0045 】

50

たとえば、サイリスタUに短絡故障が発生している場合において、サイリスタVにゲートパルスを与えてサイリスタVを導通させると、図5に示すように、サイリスタV、Uを含むように事故電流I_aの経路が形成される。そのため、事故電流I_aによって健全なサイリスタVおよび電機子巻線などの構成部品がダメージを受けることとなる。なお、事故電流I_aが大きくなるほど、構成部品へのダメージが大きくなるため、構成部品が損傷する可能性が高くなる。

【0046】

図5に示した事故電流I_aの経路は、図6のような等価回路図で表現することができる。図6の等価回路図において、リアクトルLのインダクタンスは、電機子巻線ATU、ATVが有するインダクタンスの合計値に相当する。交流電源電圧は同期機20の線間電圧V_{u-v}に相当する。電機子巻線ATU、ATV、ATVの抵抗成分は無視できるほど小さいものとする。

10

【0047】

サイリスタVを導通させると、リアクトルLを介してサイリスタVに事故電流I_aが流れる。線間電圧V_{u-v}の実効値をVとすると、線間電圧V_{u-v}は次式(1)で表される。

【0048】

【数1】

$$V_{u-v} = \sqrt{2}V \sin \theta \quad (1)$$

20

【0049】

事故電流I_aは線間電圧V_{u-v}よりも位相90°遅れた電流となる。 $\theta = \pi/2$ の場合、事故電流I_aは次式(2)で与えられる。ただし、LはリアクトルLのインダクタンスであり、 ω は同期機20の回転角速度である。

【0050】

【数2】

$$I_a = \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \sin \theta \quad (2)$$

30

【0051】

図7は、 $\theta = \pi/2 <$ のときの線間電圧V_{u-v}および事故電流I_aの動作波形を示す。なお、図7において破線で示す電流波形は $\theta = \pi/2$ のときの事故電流I_aを示している。

【0052】

事故電流I_aは、 $\theta = \pi/2$ を中心とした左右対称の波形となる。サイリスタVの導通期間 $\theta = \pi/2$ における回路方程式は次式(3)で与えられる。

【0053】

【数3】

$$V_{u-v} = \sqrt{2}V \sin \theta = L \frac{dI_a}{dt} \quad (3)$$

40

【0054】

式(3)を $\theta = \pi/2 - t$ にてI_a = 0の条件を入れて解くと、次式(4)が得られる。この電流波形は、 $\theta = \pi/2$ の電流波形の $\theta = \pi/2 - t$ の部分を取り切ったものと同じである。

【0055】

【数 4】

$$I_a = \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} (\cos \theta + \cos \gamma) \quad (4)$$

【0056】

I_a は、 $\gamma = \theta$ のときに最大となり、最大値は次式(5)で求まる。

【0057】

【数 5】

$$I_a = \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} (1 - \cos \gamma) \quad (5)$$

10

【0058】

式(5)によると、同期機20の回転速度(回転角速度)および位相制御角 γ が一定である場合、事故電流 I_a は線間電圧 $V_u - v$ が大きくなるほど大きくなることが分かる。これによると、事故電流 I_a の大きさは、インバータ2のサイリスタに短絡故障が発生したタイミングでの同期機20の誘起電圧の大きさに依存することとなる。すなわち、同タイミングでの誘起電圧が大きくなるほど、事故電流 I_a が大きくなる。

【0059】

また、事故電流 I_a の通電時間は、同期機20の回転周期 $\times 2 / 2$ で表される。したがって、通電時間は同期機20の回転速度に反比例する。これは、同期機20の回転速度が低いほど事故電流 I_a の通電時間は長くなることを表している。

20

【0060】

このように、負荷転流モード中にインバータ2の6個のサイリスタU, V, W, X, Y, Zのうちのいずれかのサイリスタに短絡故障が発生すると、サイリスタ起動装置100および同期機20の構成部品には事故電流 I_a が流れる。事故電流 I_a の大きさは、同期機20の誘起電圧が大きくなるほど大きくなる。事故電流 I_a の通電時間は、同期機20の回転速度が低くなるほど長くなる。

【0061】

ここで、図2のタイムチャートによると、負荷転流モードにおいて同期機20の回転速度が最も低くなるタイミングは、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わった直後のタイミングである。したがって、このタイミングで短絡故障が発生すると、事故電流 I_a の通電時間が最も長くなるため、構成部品に大きなダメージを与えることになる。

30

【0062】

そこで、実施の形態1によるサイリスタ起動装置100では、断続転流モードにおいて界磁を弱めることにより、同期機20に発生する誘起電圧の上昇を抑制する。断続転流モードにおける誘起電圧の上昇を抑制すると、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わった直後のタイミングでの線間電圧が小さくなる。したがって、同タイミングでの事故電流 I_a を小さくすることができる。

40

【0063】

以下、図8を用いて、実施の形態1によるサイリスタ起動装置100により行なわれる界磁制御について説明する。

【0064】

図8は、実施の形態1によるサイリスタ起動装置100の動作を示すタイムチャートであり、図2と対比される図である。図8では、図2に示した同期機20の誘起電圧の実効値および界磁電流 I_f を一点鎖線で示している。直流電流 I_d および同期機20の回転速度は図2と図8とで互いに等しいものとする。

【0065】

図8に示すように、断続転流モードにおいて、同期機20の誘起電圧の実効値が所定の

50

電圧（第1の電圧） $V E 0$ （第1の電圧値）に達すると、励磁装置21は界磁電流 $I f$ を低下させる。界磁電流 $I f$ を低下すると、界磁磁束が弱められるため、誘起電圧の上昇が抑制される。図8の例では、同期機20の回転速度に応じて界磁電流 $I f$ を低下させることにより、誘起電圧の実効値は回転速度が変わっても一定の電圧 $V E 0$ に保たれる。

【0066】

同期機20の回転速度が切り替え回転速度（定格回転速度の10%）に達すると、サイリスタ起動装置100は断続転流モードから負荷転流モードに切り替わる。負荷転流モードが開始されると、励磁装置21は界磁巻線22に一定の界磁電流 $I f$ を供給する（ $I f = I f 1$ ）。一定の界磁電流 $I f$ により回転子には一定の界磁磁束が発生する。この状態で同期機20を加速させることにより、同期機20に発生する誘起電圧の実効値は同期機20の回転速度と比例的に変化する。

10

【0067】

同期機20に発生する誘起電圧の実効値が $V E 2$ （第2の電圧値）に達すると、励磁装置21は界磁巻線22に供給する界磁電流 $I f$ を低下させる。これにより、誘起電圧の実効値は回転速度が変わっても一定の電圧 $V E$ に保たれる。

【0068】

ここで、図2および図8の各々において、切り替え回転速度における誘起電圧の実効値に着目すると、断続転流モード中一定の界磁電流 $I f$ （ $I f = I f 0$ ）を界磁巻線22に供給したときの実効値 $V E 1$ （図2）に比べて、断続転流モードにおいて界磁電流 $I f$ を低下させたときの実効値 $V E 0$ （図8）は小さくなっている。よって、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わった直後のタイミングで短絡故障が発生した場合、同タイミングでの誘起電圧は、図8での電圧値が図2での電圧値よりも小さくなることが予想される。したがって、事故電流 $I a$ を小さくすることができるため、事故電流 $I a$ が構成部品に与えるダメージを低減することができる。なお、 $V E 0$ は、インバータ2のサイリスタおよび同期機20の構成部品の耐圧に基づいて設定することができる。

20

【0069】

以上説明したように、この発明の実施の形態1によるサイリスタ起動装置によれば、断続転流モードにおいて同期機20に発生する誘起電圧の上昇を抑制することにより、断続転流モードから負荷転流モードに切り替わった直後のタイミングでの事故電流を小さくすることができる。この結果、事故電流によるサイリスタ起動装置および同期機の構成部品の損傷を抑制することができる。

30

【0070】

[実施の形態2]

上述した実施の形態1で述べたように、断続転流モードにおいて同期機20の誘起電圧の上昇を抑制した場合、インバータ2から同期機20に供給される交流電力が低下する。そのため、同期機20の昇速率（回転速度が上昇する比率）が低下し、断続転流モードに費やされる時間が長くなる可能性がある。その結果、同期機20の起動に時間がかかってしまうという不具合が起こり得る。

【0071】

そこで、実施の形態2によるサイリスタ起動装置100においては、断続転流モードにおいて、界磁電流 $I f$ の低下に合わせて、コンバータ1から出力される直流電流 $I d$ を増加させることにより、同期機20への供給電力の低下を抑制する。

40

【0072】

図9は、断続転流モード時の同期機20の回転速度とコンバータ1から出力される直流電流 $I d$ との関係を模式的に示すタイムチャートである。

【0073】

図9では、界磁巻線22に一定の界磁電流 $I f$ を供給している期間において、コンバータ1から出力される直流電流 $I d$ の最大値（すなわち、パルスの波高値）を $I 0$ とする。これに対して、界磁電流 $I f$ を低下させている期間において、コンバータ1から出力される直流電流 $I d$ の最大値（すなわち、パルスの波高値）を $I 1$ とする（ $I 1 > I 0$ ）。

50

【 0 0 7 4 】

I 1 を I 0 よりも大きくすることで昇速率が上がるため、直流電流 I d を I 0 とした場合に比較して同期機 2 0 が切り替え回転速度（定格回転速度の 1 0 %）まで加速される時間を短縮することができる。なお、I 1 の大きさを調整することで、図 2 と図 9 との間で断続転流モードに費やされる時間を等しくすることができる。

【 0 0 7 5 】

図 9 に示した直流電流 I d の調整は、電流指令値 I d * を調整することで実現することができる。図 1 0 は、断続転流モード時の同期機 2 0 の回転速度と電流指令値 I d * との関係の一例を示す図である。

【 0 0 7 6 】

図 9 に示すように、同期機の回転速度が 0 r p m 以上定格回転速度の X % 以下となるときには、電流指令値 I d * は I 0 に設定される。一方、同期機 2 0 の回転速度が定格回転速度の X % よりも高く 1 0 % 以下となるときには、電流指令値 I d * は I 1 に設定される。定格回転速度の X % は、界磁電流 I f を一定としたときに同期機 2 0 の誘起電圧の実効値が V E 1 となる回転速度に相当する。

【 0 0 7 7 】

図 9 に示される関係を示すデータは、サイリスタ起動装置 1 0 0 内部のメモリに記憶しておくことができる。コンバータ制御部 1 3 は、当該データを参照することによって、演算した同期機 2 0 の回転速度に基づいて電流指令値 I d * を生成することができる。なお、データの形式はテーブルであっても関数であってもよい。

【 0 0 7 8 】

以上説明したように、この発明の実施の形態 2 によるサイリスタ起動装置によれば、実施の形態 1 と同様の作用効果のほかに、短時間で同期機 2 0 を起動させることが可能となる。

【 0 0 7 9 】

[実施の形態 3]

サイリスタ起動装置 1 0 0 によって同期機 2 0 の電機子巻線 A T U , A T V , A T W を通電した場合、電機子巻線 A T U , A T V , A T W には熱損失（ジュール熱）が発生する。熱損失は電流の大きさの二乗に比例する。熱損失によって同期機 2 0 が過熱されるのを防ぐため、同期機 2 0 には冷却構造が設けられているものがある。

【 0 0 8 0 】

図 1 1 は、同期機 2 0 の冷却構造の一例を示す断面図である。図 1 1 を参照して、同期機 2 0 の機内では、回転子 2 4 の回転軸にはファン 2 5 が取り付けられている。ファン 2 5 は、回転子 2 4 の回転によって回転駆動される。ファン 2 5 が回転すると、図中矢印に示すように、回転子 2 4 および固定子 2 6 に形成される通風路に冷却媒体が循環される。冷却媒体には、たとえば水素ガスまたは空気が用いられる。固定子枠内には通風路に面して冷却器 2 7 が設置されている。通風路を循環した冷却媒体は、冷却器 2 7、固定子枠内に通風路に面して設置された冷却器 2 7 によって冷却される。

【 0 0 8 1 】

このように、回転子 2 4 の回転力を利用してファン 2 5 を回転させているため、同期機 2 0 の回転速度が低いときには、ファン 2 5 の回転速度も低くなる。そのため、通風路に冷却媒体を循環させることが困難となり、結果的に冷却媒体の冷却能力が低下することとなる。したがって、上述した実施の形態 2 のように、断続転流モードにおける直流電流 I d を高くすると、同期機 2 0 が過熱してしまう可能性がある。

【 0 0 8 2 】

なお、冷却媒体の冷却能力を高めることで同期機 2 0 の過熱を抑制しようとする、冷却器の容量を大きくせざるを得ず、装置の大型化を招く可能性がある。

【 0 0 8 3 】

そこで、実施の形態 3 によるサイリスタ起動装置 1 0 0 においては、同期機 2 0 の誘起電圧が V E 1 となる回転速度範囲において、電流指令値 I d * を、同期機 2 0 の回転速度

10

20

30

40

50

が高くなるに従って電流値が大きくなるように設定する。

【 0 0 8 4 】

図 1 2 は、断続転流モード時の同期機 2 0 の回転速度とコンバータ 1 から出力される直流電流 I_d との関係を模式的に示すタイムチャートである。

【 0 0 8 5 】

図 1 2 に示すように、同期機 2 0 が定格回転速度の $X\%$ から $Y\%$ (ただし、 $X < Y < 100$) に到達するまでの期間において、コンバータ 1 から出力される直流電流 I_d の最大値 (すなわち、パルスの波高値) を I_2 とする。また、同期機 2 0 が定格回転速度の $Y\%$ から 100% (切り替え回転速度) に到達するまでの期間において、コンバータ 1 から出力される直流電流 I_d の最大値 (パルスの波高値) を I_3 ($I_3 > I_2$) とする。

10

【 0 0 8 6 】

定格回転速度の $Y\%$ は、たとえば、通風路に冷却媒体を循環させることが可能なファン 2 5 (図 1 1 参照) の下限回転速度に基づいて設定することができる。これによると、冷却媒体の冷却能力の低下を招く回転速度範囲 ($0 \sim$ 定格回転速度の $Y\%$) においては、同期機 2 0 に供給される電流が低い電流値になるため、同期機 2 0 の熱損失 (ジュール熱) が抑えられる。その結果、同期機 2 0 の過熱を抑制することができる。

【 0 0 8 7 】

その一方で、同期機 2 0 の回転速度が上記回転速度範囲よりも高くなると、すなわち、冷却媒体の冷却能力が確保されると、同期機 2 0 に供給される電流を増加させる。これにより、同期機 2 0 の昇速率を高めることができるため、断続転流モードに費やされる時間が長引くことを防ぐことができる。

20

【 0 0 8 8 】

図 1 2 では、図 9 に示した同期機 2 0 の回転速度および直流電流 I_d が一点鎖線で示されている。 I_2 、 I_3 と I_1 との間には、 $I_2 < I_1 < I_3$ の関係が成り立っている。 I_3 を I_1 より大きくすることで昇速率が上がるため、直流電流 I_d を I_1 とした場合に比較して、同期機 2 0 が定格回転速度の $Y\%$ から $X\%$ まで加速される時間を短縮することができる。なお、 I_3 の大きさを調整することで、図 9 と図 1 3 との間で断続転流モードに費やされる時間を等しくすることができる。

【 0 0 8 9 】

図 1 2 に示した直流電流 I_d の調整は、同期機 2 0 の回転速度に応じて電流指令値 I_d^* を調整することで実現することができる。すなわち、同期機 2 0 の回転速度が定格回転速度の $X\%$ よりも高く 100% 以下となるときには、電流指令値 I_d^* は、同期機 2 0 の回転速度が高くなるに従って電流値が大きくなるように設定される。

30

【 0 0 9 0 】

これによると、同期機 2 0 の回転速度が上記範囲にあるときには、電流指令値 I_d^* は同期機 2 0 の回転速度に応じて変化することになる。本願明細書において、「同期機 2 0 の回転速度に応じて変化する」とは、同期機 2 0 の回転速度に応じて電流指令値 I_d^* が離散的に変化すること、または同期機 2 0 の回転速度に応じて電流指令値 I_d^* が連続的に変化することを意味している。

【 0 0 9 1 】

図 1 3 は、断続転流モード時の同期機 2 0 の回転速度と電流指令値 I_d^* との関係を示す図である。図 1 3 に示すように、同期機の回転速度が 0 rpm 以上定格回転速度の $X\%$ 以下となるときには、電流指令値 I_d^* は I_0 に設定される。一方、同期機 2 0 の回転速度が定格回転速度の $X\%$ よりも高く $Y\%$ 以下となるときには、電流指令値 I_d^* は I_2 に設定される。さらに、同期機 2 0 の回転速度が定格回転速度の $Y\%$ よりも高く $X\%$ 以下となるときには、電流指令値 I_d^* は I_3 に設定される。

40

【 0 0 9 2 】

図 1 3 に示される関係を示すデータはサイリスタ起動装置 1 0 0 内部のメモリに記憶しておくことができる。コンバータ制御部 1 3 は、当該データを参照することによって、演算した同期機 2 0 の回転速度に基づいて電流指令値 I_d^* を生成することができる。な

50

お、データの形式は、テーブルであっても関数であってもよい。

【0093】

以上説明したように、この発明の実施の形態3によるサイリスタ起動装置によれば、実施の形態1と同様の作用効果のほかに、以下の作用効果を奏する。同期機20が回転子の回転力を利用して同期機20を冷却する構造を採用している場合でも、同期機20の過熱を抑えながら、短時間で同期機20を起動させることができる。また、同期機20の過熱を抑制するための冷却構造の大型化を抑制することができる。

【0094】

なお、上述の実施の形態3では、同期機20の回転速度が定格回転速度のX%よりも高く10%以下となるときには電流指令値 I_d^* を2段階で変化させる構成(図13参照)について例示したが、3段階以上で変化させてもよい。

10

【0095】

あるいは、図14に示すように、同期機20の回転速度が定格回転速度のX%よりも高く10%以下となるときには、同期機20の回転速度に応じて電流指令値 I_d^* を連続的に変化させてもよい。図14の例では、電流指令値 I_d^* は同期機20の回転速度が0rpm以上定格回転速度のX%以下のときに I_0 であり、同期機20の回転速度が定格回転速度の10%(切り替え回転速度)のときに I_4 ($I_4 > I_0$)となっている。同期機20の回転速度が定格回転速度のX%よりも高く10%以下となるとき、電流指令値 I_d^* は回転速度に応じて線形的に変化している。

【0096】

20

なお、上述した実施の形態1~3では、同期機20が火力発電所においてガスタービンによって回転駆動される発電機である場合について説明したが、これに限るものではなく、同期機20は一般産業分野で使用される同期機であってもよい。たとえば、同期機20は、製鉄所の冷却ブロワ用の同期機であってもよい。

【0097】

今回開示された実施の形態は例示であって、上記内容のみに限定されるものではない。本発明の範囲は請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内のすべての変更が含まれることが意図される。

【符号の説明】

【0098】

30

1 コンバータ、2 インバータ、3 直流リアクトル、4, 5 変流器、6 電圧検出器、7 位置検出器、9 電流検出器、10 インバータ制御部、11, 16 制御角演算部、12, 17 ゲートパルス発生器、14 速度制御部、15 電流制御部、20 同期機、21 励磁装置、22 界磁巻線、24 回転子、25 ファン、26 固定子、27 冷却器、30 交流電源、100 サイリスタ起動装置、ATU, ATV, ATW 電機子巻線、U, V, W, X, Y, Z サイリスタ、TR 変圧器。

【図1】

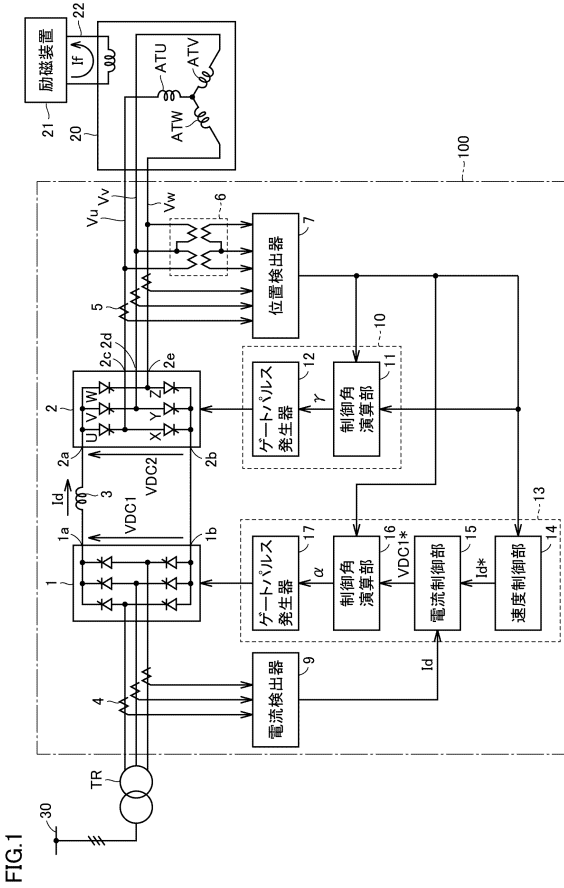


FIG.1

【図3】

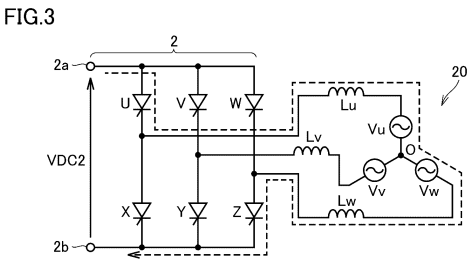


FIG.3

【図2】

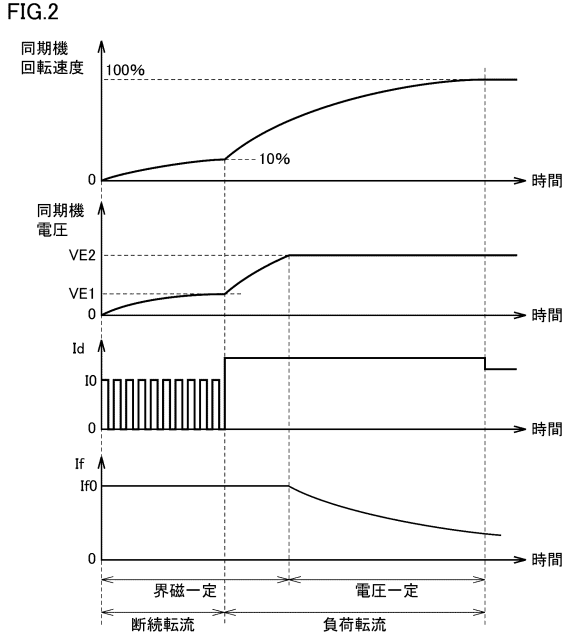


FIG.2

【図4】

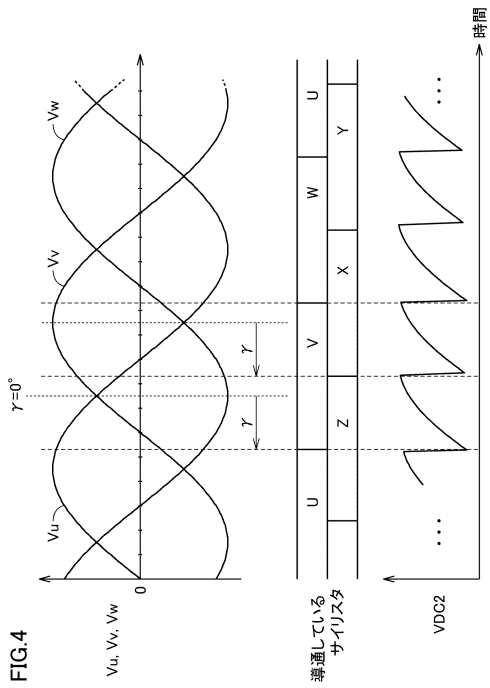
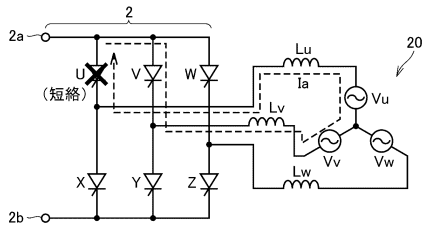


FIG.4

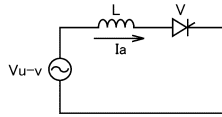
【 図 5 】

FIG.5



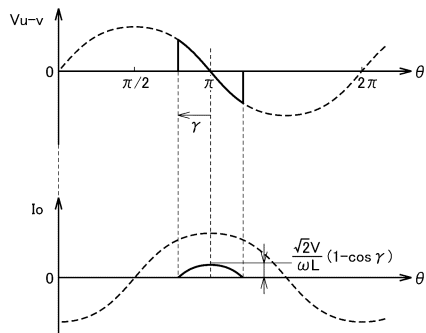
【 図 6 】

FIG.6



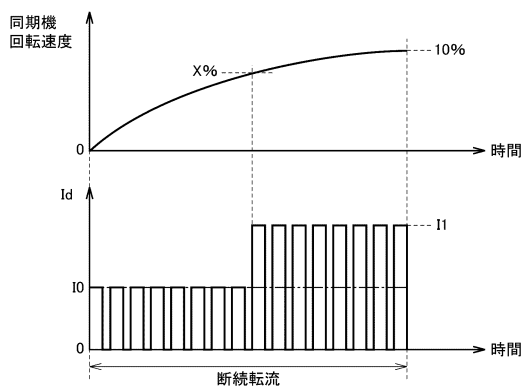
【 図 7 】

FIG.7



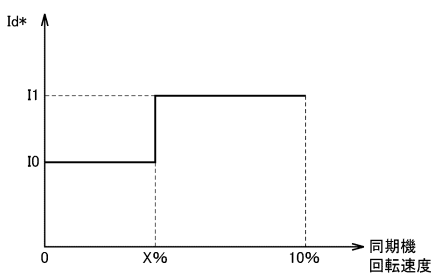
【 図 9 】

FIG.9



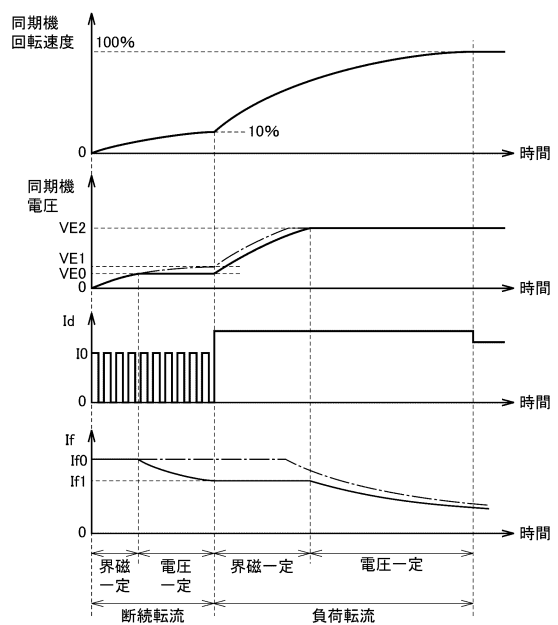
【 図 1 0 】

FIG.10



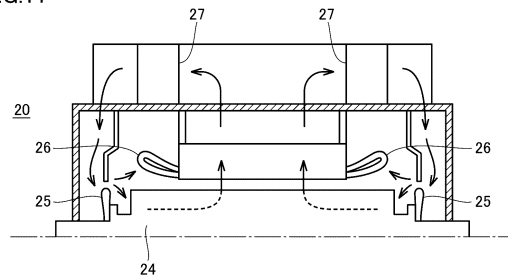
【 図 8 】

FIG.8



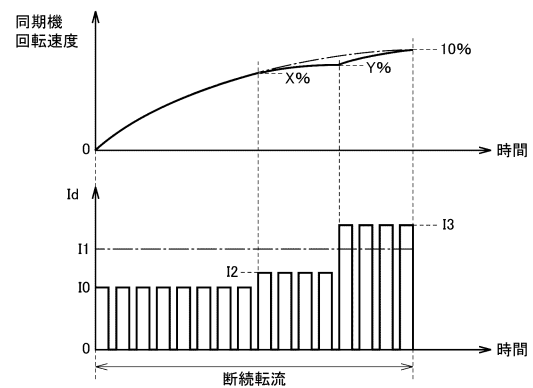
【 図 1 1 】

FIG.11



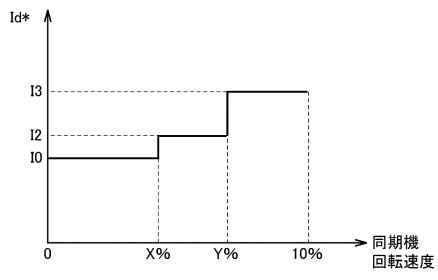
【 図 1 2 】

FIG.12



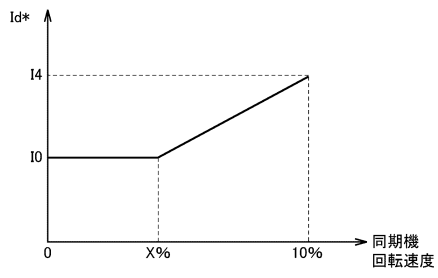
【 図 1 3 】

FIG.13



【 図 1 4 】

FIG.14



フロントページの続き

- (72)発明者 川口 裕敬
東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内
- (72)発明者 安藤 彰修
東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内
- (72)発明者 宮武 亮治
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 片岡 道雄
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内

審査官 尾家 英樹

- (56)参考文献 特開昭47-40111(JP,A)
特開昭53-132720(JP,A)
特開昭58-190288(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02P 1/46