

省エネルギー可変速度電動機の安定運転

Security Drive Under Instantaneous Power Fault Conditions

送配水管路網においてポンプの速度急変は水圧の急変を起し、またポンプ停止は需要家への断水をひき起こす。

省エネルギーの代表的駆動システムであるサイリスタ・セルビウス制御、インバータ制御などの電動機は、電源擾乱を受けると、時に異常電圧、異常電流を発生し電動機を停止させることがある。この停止を防止するために、(1)瞬時停電時の現象、(2)電源電圧回復時の現象を把握し、短時間の電源擾乱が起こってもポンプ駆動を継続する制御方式を開発し、実験によりその効果を確認した。

市川博昭* Ichikawa Hiroaki

堀 孝正** Hori Takamasa

岡島郁夫*** Okajima Ikuo

1 緒 言

水資源が豊富であった時代は既に過去のものとなり、今や水は他のエネルギーとともにその資源を有効に使用しなくてはならなくなった。

水資源を有効に活用することは、需要水量に応じて送水するようにポンプ駆動用電動機の可変速度制御を行なうことが不可欠なことであるが、電動機速度を変化させる各種の方式の中で、エネルギー損失の少ない方式としてのサイリスタ・セルビウス方式、サイリスタ・クレーマ方式、インバータ方式などが最近特に注目を集めてきた。

さて、需要家に対する確実な水供給の維持は、上水道事業として基本的なポイントであり、上記サイリスタ応用制御においてもハードウェアの信頼性向上はもちろんであるが、電源の擾乱、例えば瞬時停電、欠相、不平衡などの現象が発生しても電動機が停止することなく送水を継続し、また送水管路網に衝撃を与えることがないようにポンプの回転を復帰させることが要求される。

本稿は、送水ポンプ及び送水系が電源擾乱を受けた際の現象について解析し、サイリスタ・セルビウス方式が本質的に持っている弱点である電源擾乱による運転停止を解決する方策について主として述べる。このほか、最近急激に需要が増加してきたインバータ駆動による配水ポンプについて説明する。

2 可変速度制御の特色

誘導電動機の可変速度制御方式には種々の方法が実用化されており、経済性、設備条件、使いやすさなど総合的な見地から方式を決定している。上水道に適用されている各種方式の特徴をまとめると、表1に示すようになる。このうち、二次回路の電力を電源に返還するセルビウス方式、駆動軸に力を加算するクレーマ方式、及び必要とする動力しか供給しないインバータ方式が、省エネルギー時代に注目を集めている方法である。一方、各方式が現在の技術で経済的に適用できる電動機容量のマップは図1に示すようになる(二次抵抗制御方式は基本的な方式であるので、マップから除外した)。大容量機はセルビウス方式かクレーマ方式が適しているが、現状はサイリスタ・セルビウス方式が国内外共、多く使用されており、また関心が持たれている。

上水道用ポンプ駆動は、それが公共事業のために断水を防止し、水供給の信頼性向上が要求されている。サイリスタ・

セルビウス方式での弱点は、電動機二次電力を電源に返還するインバータ装置が、瞬時停電、欠相などの電源擾乱を受ける結果、転流能力を失い直流回路の過電流をひき起こして電動機を停止させてしまうことにある。この結果、送水が途絶えてしまうので、このような電源擾乱が起こっても、電動機の運転を継続することが水を供給する信頼性確保の見地から特に重要視されてきている。

3 電源擾乱下での水圧変化の例

送水ポンプ所Aから圧力配管による送水計画について検討した結果の一例を示すと、次のようになる。

(1) ポンプの回転数低下

図2は、送水ポンプが運転中に電源をそう失した場合に時間とともにどのように速度が低下するかを計算で求めたものである。100%速度で運転していると、0.5秒の停電の結果、約20%の速度低下となる。

(2) 水圧の変化

図3は、送水ポンプ所Aから圧力配管によって送水する場合、

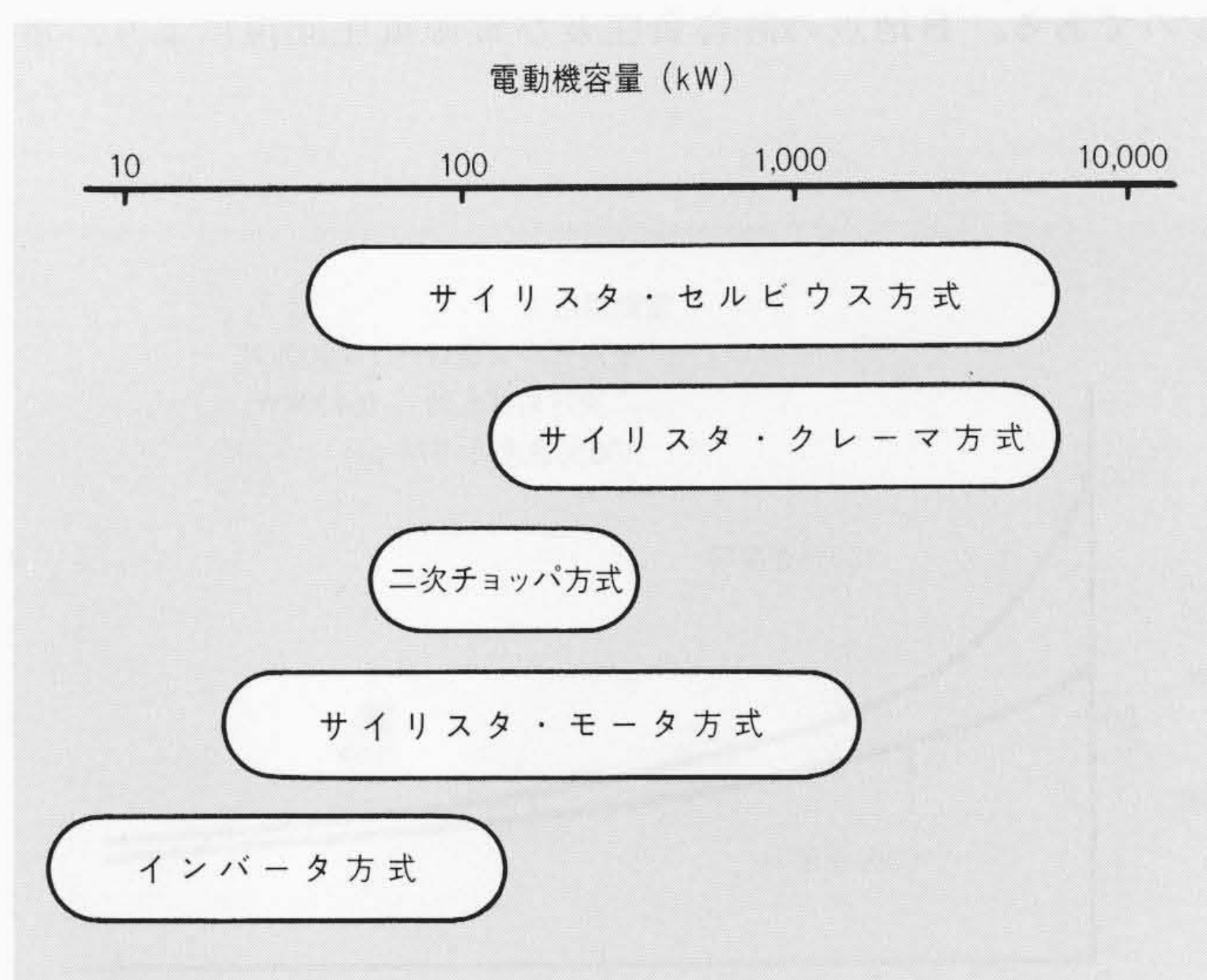


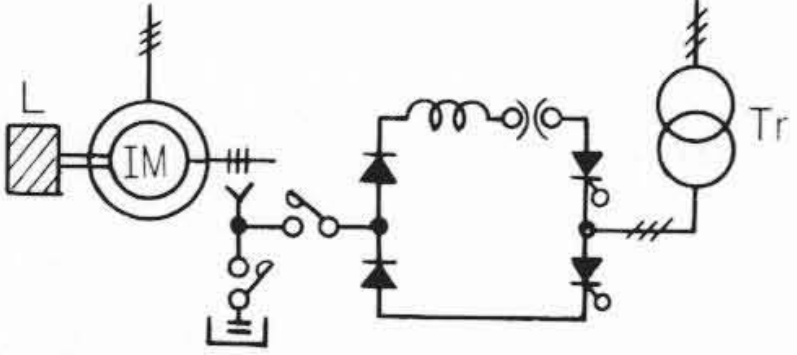
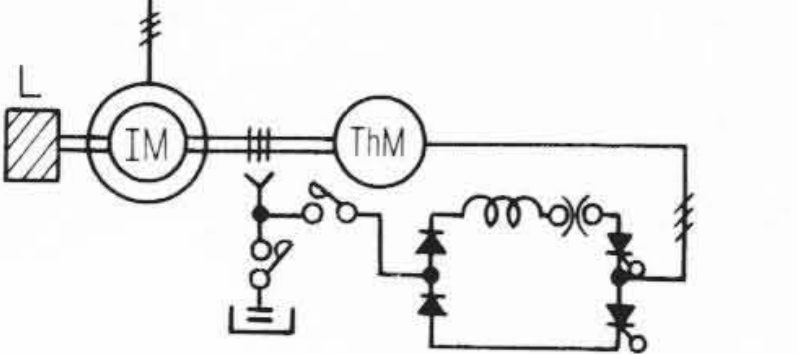
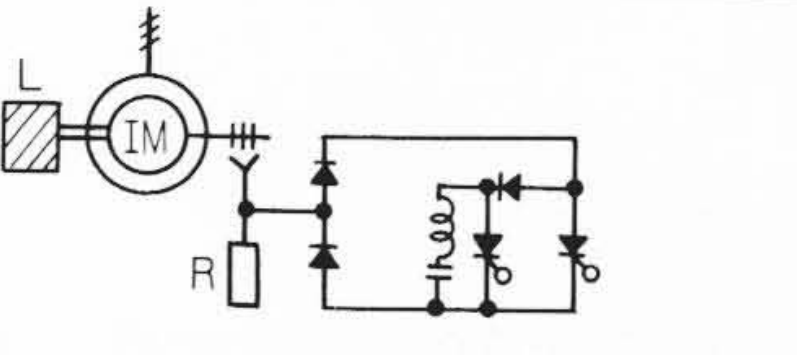
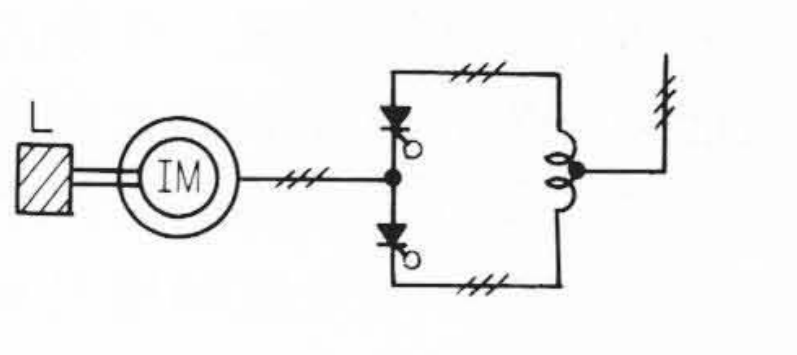
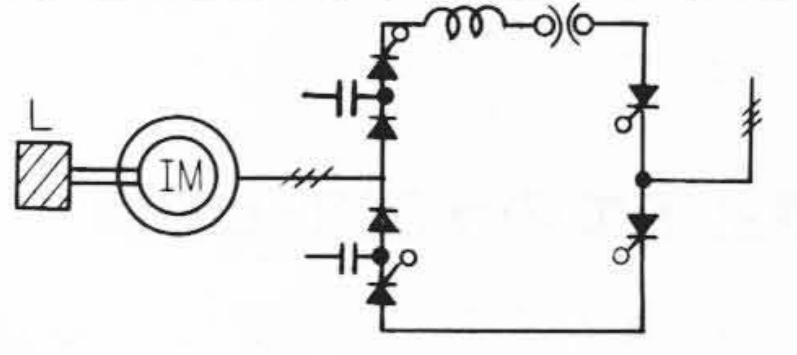
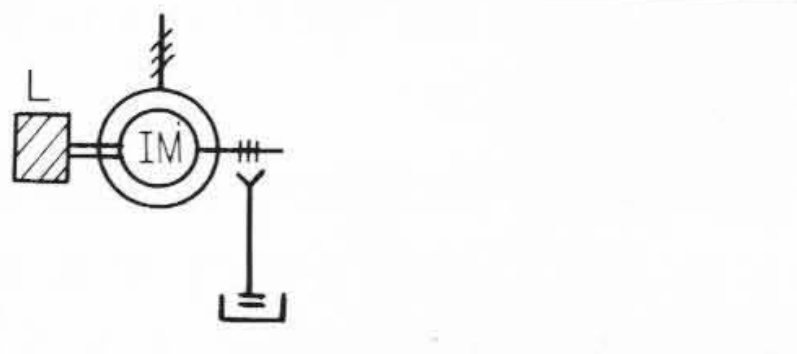
図1 制御方式マップ 電動機容量に対し、どの制御方式が経済的に適用できるかを示す。

* 日立製作所大みか工場

** 日立製作所研究開発推進センタ 工学博士

*** 日立製作所習志野工場

表1 各種制御方式の特性比較表 制御方式の特徴を一覧表に示した。

制 御 方 式	概 要	制 御 性	運動効率	速度変動率	連続使用速度	設 備 費
サイリスタ・セルビウス方式	 電動機二次回路の電力を、ダイオードで直流に変換した後、サイリスタで構成するインバータによって電源に返還する。電力もどり量を調整することで速度を変える。	◎	◎	◎	65~100% N(回転数)	○
サイリスタ・クレーマ方式 ^{1), 2)}	 電動機二次回路の電力をダイオードで直流に変換した後、サイリスタで構成するインバータ(周波数可変)で三相交流を作り、IMに直結したサイリスタ・モータの電源とする。(IM+ThM)となり、慣性モーメントが大きくなる。	◎	◎	◎	65~100	○
チョッパ方式 ³⁾	 電動機二次回路の電力を二次抵抗器に消費させるが、一方、サイリスタ・チョッパ回路によって二次回路を短絡する。チョッパ導通時間幅を変えて、電動機二次回路の等価抵抗値を変えることにより速度を変える。	○	△	○	65~100	◎
サイリスタモータ方式 ⁴⁾	 三相交流電源を18レグのサイリスタ・ユニットを使いゲート制御を行ない、電源周波数の1/2以下の可変周波数電源を生み出し、電動機を運転する。	◎	○	◎	3~100	○
インバータ方式	 純ブリッジにより電源電力を順変換し、ブロック・ダイオード及び転流コンデンサ付の三相純ブリッジ回路により交流に変換して、かご形誘導電動機を運転する。	◎	○	◎	10~100	○
二次抵抗制御方式	 電動機二次回路の電力を、二次抵抗器に消費させることにより、電動機回転数を変化させる。	△	△	△	65~100	◎

注：◎＝優， ○＝良， △＝可 IM＝誘導電動機， L＝負荷， Tr＝変圧器， ThM＝サイリスタモータ， R＝抵抗器

A地点からの距離において、電源そう失の結果図2のようにポンプの回転数が低下してゆくときの水圧の変化を計算したものである。B地点の許容負圧及び電源電圧回復により、ポ

ンプモータが加速した際の水撃などの面から検討し、この例では「瞬時停電」として処理すべきものは最大0.6秒までである。

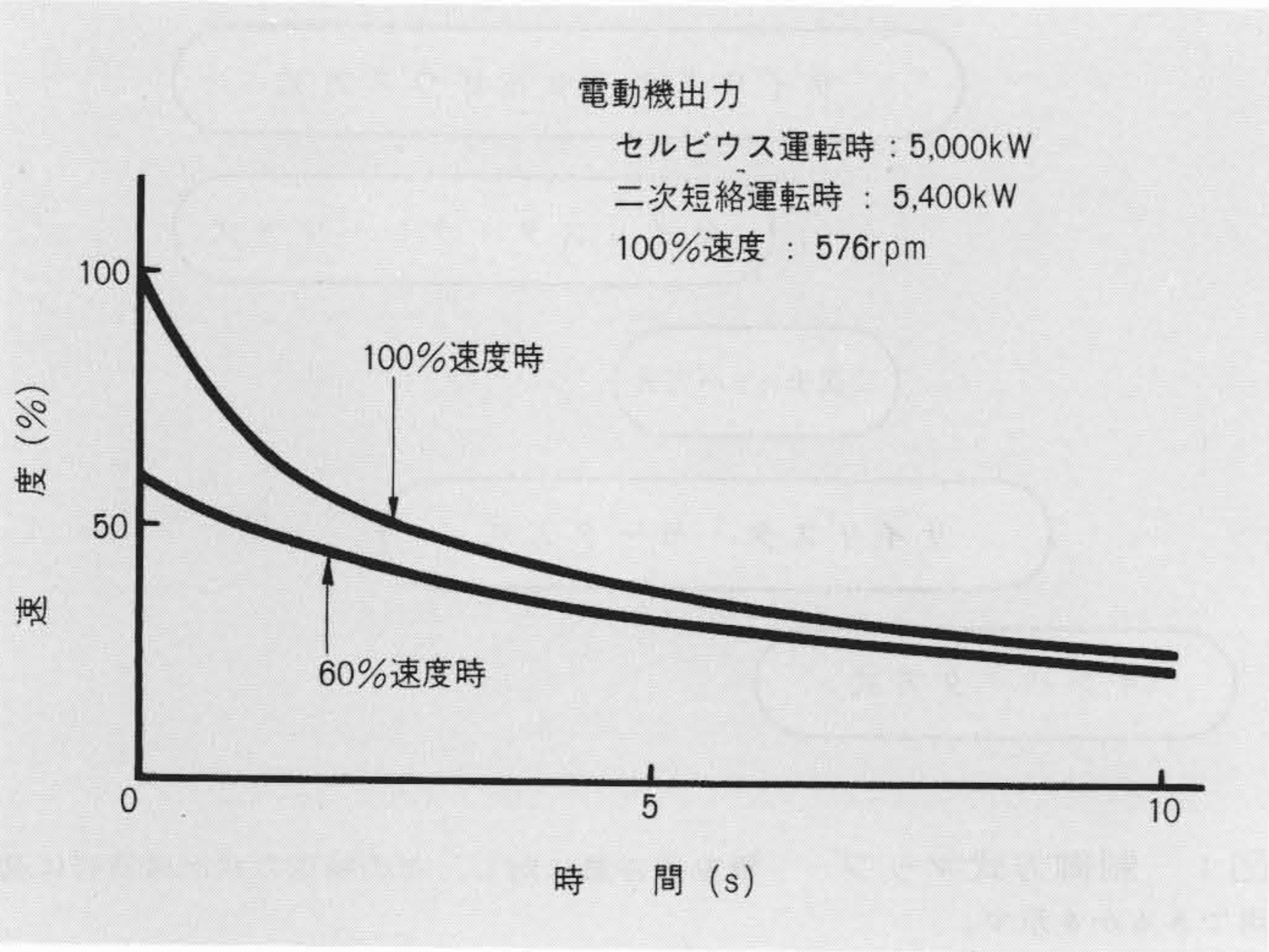


図2 停電時ポンプ電動機の水速減衰特性 100%速度で運転中、0.5秒停電となると回転数は80%に低下する。

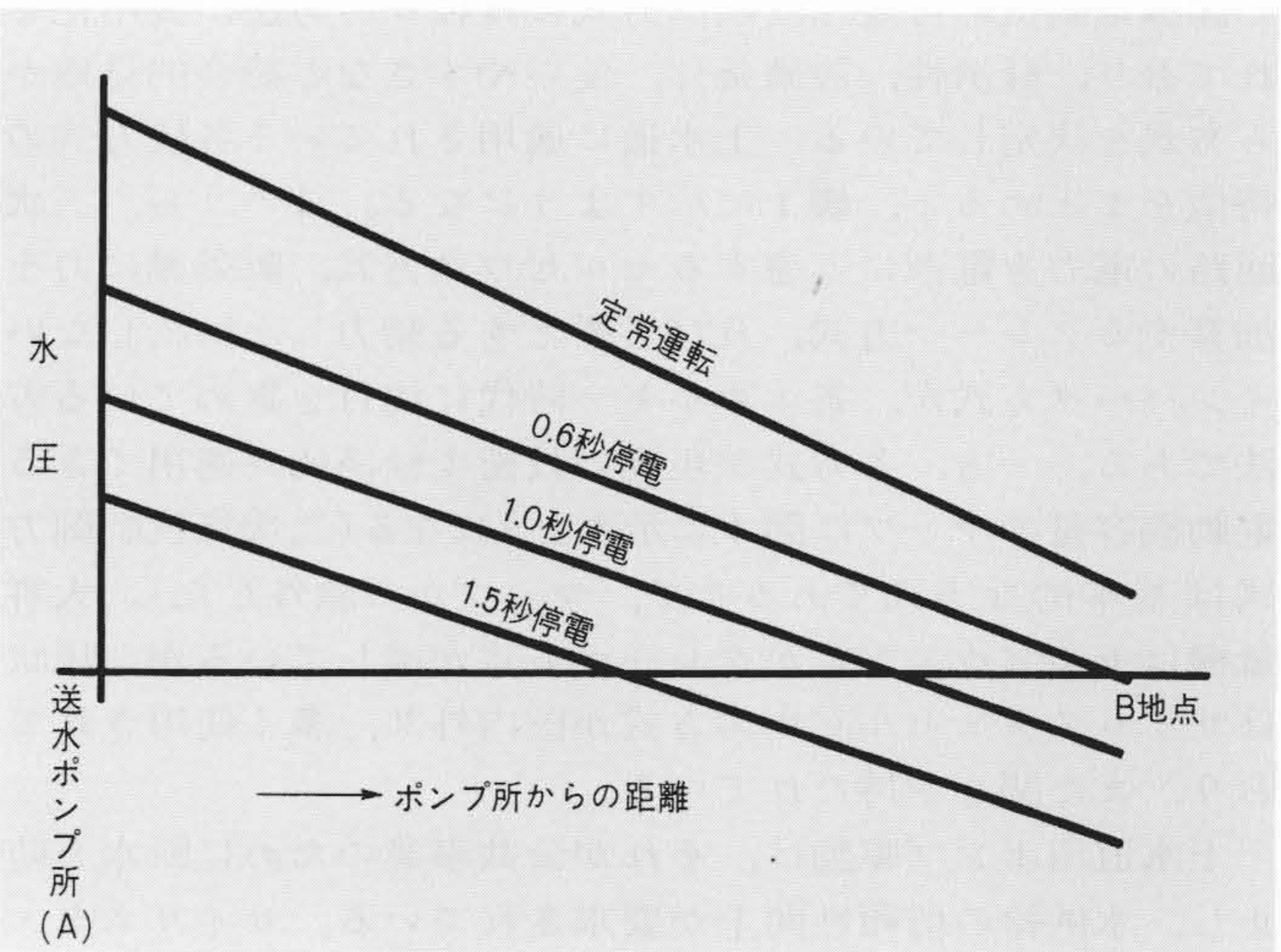


図3 瞬時停電時の圧力変化 送水管の圧力は、停電によってポンプ回転数が低下すると、管内圧力は図示のように低下し、中継点では0.6秒を超えると負圧となる。

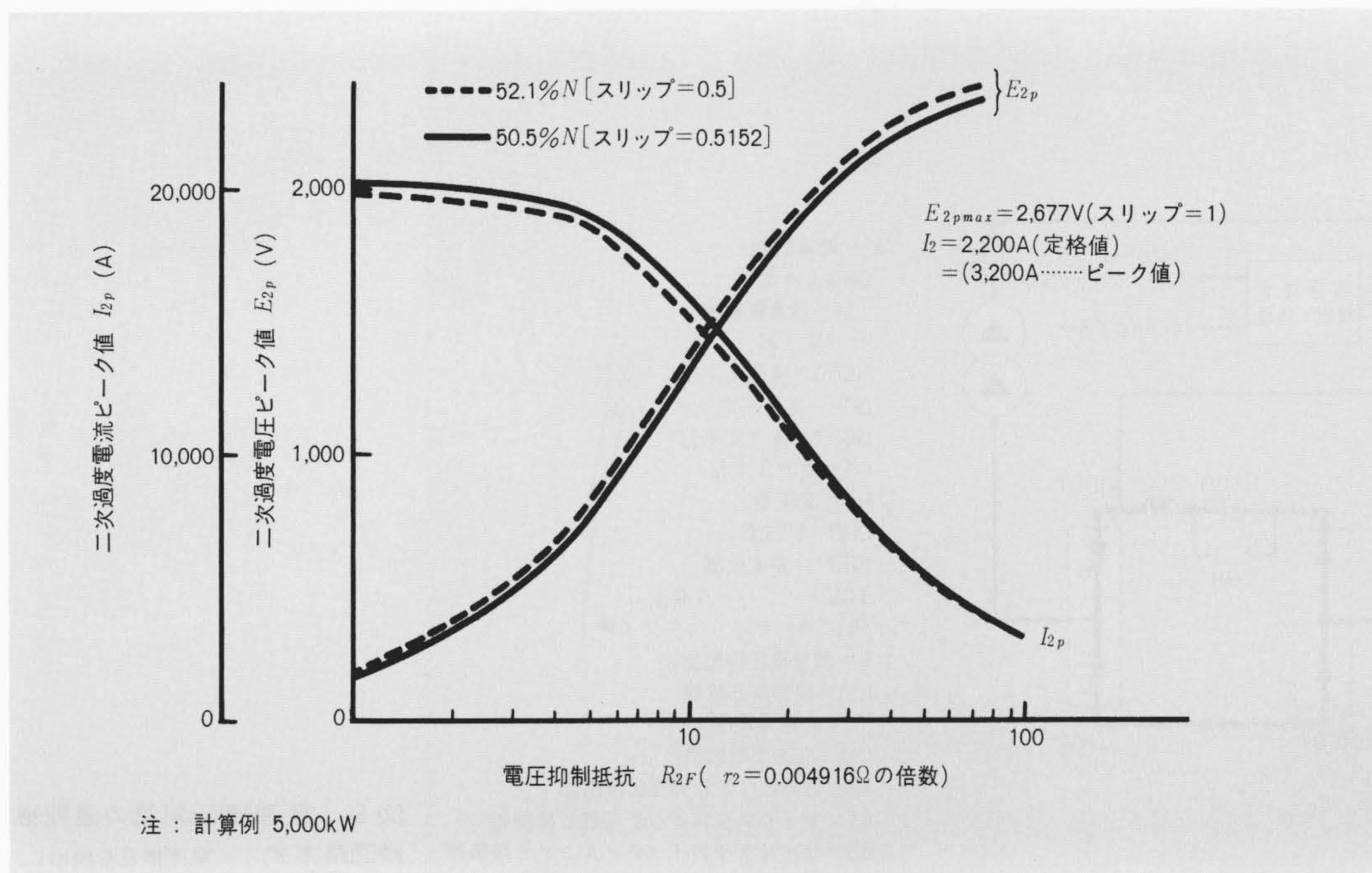


図4 抑制抵抗値と二次過渡電圧及び過渡電流(計算値の例)
抑制抵抗値を、回転子抵抗値の何倍に選ぶと過渡電圧及び過渡電流は、どのように抑制されるかを示す。

4 サイリスタ・セルビウス制御の瞬時停電対策

4.1 瞬時停電の現象

一般に瞬時停電といわれる現象も、送電系統によって三相欠相、一相欠相があり、また一線地絡などに起因する三相電圧の不平衡現象は電源擾乱の約80%ある。電力中央研究所のデータ⁵⁾によると、110～154kV系の電源擾乱の時間は、0.5秒以内のものが全体の約75%を占めている。ポンプ駆動について注目すると、前述のように全負荷運転を行なっている場合に0.5秒間の停電は、約20%の回転数降下を来すし、一方、受電設備での停電検出リレーの動作を考慮し電源擾乱の期間を0.5秒以内として対策することにした。セルビウス制御だけについて考えると、瞬時停電での対策は、停電発生直後の電圧電流位相関係と、これに基づく転流余裕で決まってしまう、電源擾乱が0.5秒を超えても制御系は、二次回路に運転継続用の抵抗器が既に結合されているから、停電時間の長さそれ自体は大きな意味を持つものではない。

セルビウス制御において、電源擾乱が原因となって影響を及ぼすことは次の2点である。

- (1) 電源そう失直後、交流電圧そう失のためにインバータ装置のサイリスタが転流不能となる。
- (2) 電源回復時に電動機二次回路に高い電圧を誘起する。このため、直流回路電圧が高くなりインバータ制御の転流余裕がなくなる。

この対策として、(1)に対しては電源擾乱を1Hz以内で検出し、交流側の残留電圧のあるうちにインバータ装置のサイリスタのゲート信号をシフトし、インバータをブロックする。(2)に対しては、電源電圧回復時の異常電圧を抑制する回路を設けることである。電源電圧回復時に電動機二次回路に誘起される電圧は、二次回路の抵抗値によって影響を受け、計算によると例えば図4に示すようになる。この抵抗器を、異常電圧抑制抵抗と呼ぶことにする。抵抗値を小さくすると電圧の誘起は小さいが、電源電圧回復時の電動機一次電流が大きくなる。抵抗値を大きくすると電圧抑制の効果が減ってしまう。したがって、電圧を幾らに抑制するか、突入電流はどの

くらいまで認められるか、更に、セルビウス制御に再投入するまでの間、電動機の回転数を幾らに維持するかなどの条件から抑制抵抗値を決める。

4.2 瞬時停電に対する運転継続方法

- 図5は、電源擾乱を受けても運転を継続するように新たに開発した制御システムを示す。このシステムの主な特徴は、
- (1) 瞬時停電の検出を電動機一次電流(I_1)と、直流電流(I_{dc})との比例関係が崩れること(特許出願中)、及び低電圧で1Hz以内に検出する。
 - (2) 上記検出の結果、インバータ装置のサイリスタのゲート信号をシフトし、インバータ動作をブロックさせる。
 - (3) 電動機二次回路を、電源復帰前に抑制抵抗器につなぐ。このため、サイリスタ・スイッチを使う。一方、整流器以降の直流回路を切り離し、電源電圧回復時の高い電圧ストレスが印加されないように配慮している。
 - (4) 回転数70%近辺での一相欠相電源不平衡の場合は、転流余裕がなくなり、インバータのサイリスタをブロックしきれない。この結果、直流回路のしゃ断器がしゃ断するが、(3)による抑制抵抗器で電源電圧回復後の運転を継続し、セルビウス制御の条件が再び整ったならば自動的にセルビウス制御に切り換わる(特許出願中)。
- ことなどに特色を持っている。

前項で述べたように、抑制抵抗を経済的に選ぶ結果、電源電圧回復時の異常電圧はかなり抑制されるが、整流装置、インバータ装置に無用の電圧ストレスを加えないために接触器42は瞬時停電検出と同時に開路される。機械的動作の遅れがあるので、サイリスタ・スイッチが導通になってから実際には開路する。

したがって、極めて短時間に電源回復する数少ない条件を除き、電圧ストレスを防いでいる。

起動用抵抗器は多くの場合、液体抵抗器を用いている。液体抵抗器は、電解液濃度、水温によって電極位置が同じであっても抵抗値が大きく違う。起動後、セルビウス運転に切り換えたときの抵抗値に再現性が乏しいので、これを抑制抵抗に使うことは好ましくない。

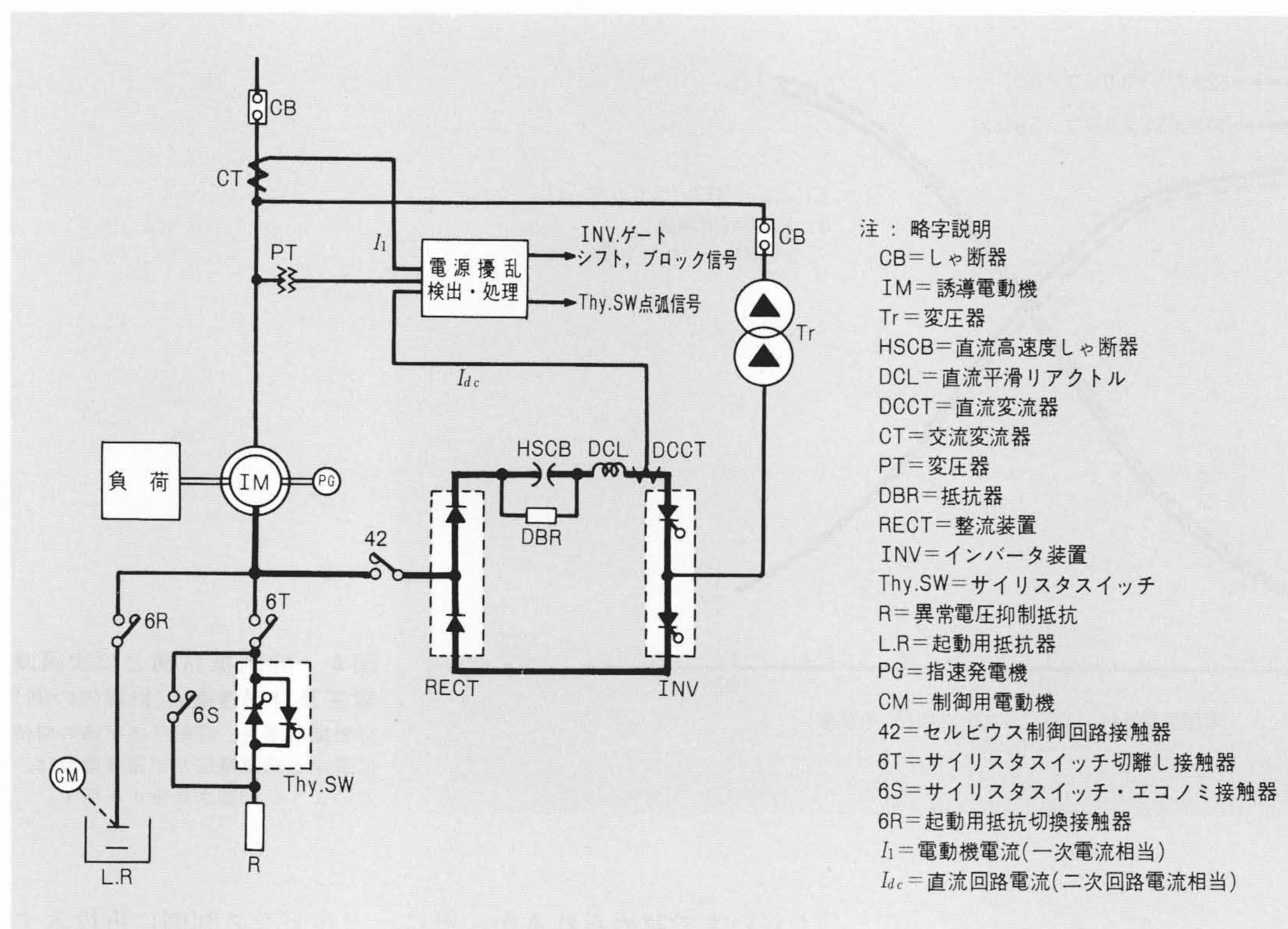


図5 電源擾乱対策の運転継続回路方式 電源擾乱を検出し、インバータをブロックする。一方、電源電圧回復時の過渡電圧を抑制するために二次回路に電圧抑制抵抗器をつなぐ。

4.3 瞬時停電対策の効果

既に説明したように、電源擾乱が起こったときにセルビウス制御装置が安定に退避できるか否かは、停電現象が起こった後の2Hzほどの区間で直流電流をカットできるか否かで決まり、電源電圧回復までの時間が0.1秒であろうと0.5秒であろうと、それ自体には重要な意味は存在しない。

図6は電源擾乱の一例として、電源が三相共0.6秒間欠相した場合、及び一相欠相による三相不平衡電源の条件下の電動機の電気的特性を示すものである。

電動機は停電期間中、電力の供給がないから速度が降下してゆく。セルビウス制御の直流電流は停電の検出とともにサイリスタのゲートパルスのシフトと、ゲートサプレスが行なわれた結果、電流は約20msで零となっている。

0.6秒後の電源電圧回復の結果、電動機二次回路には抑制抵抗器が結合されているが、電動機一次電流、二次電流及び二次電圧は瞬時停電前の値より大きな過渡値が現われていることが分かる。

電源が回復した結果、電動機は抑制抵抗器を二次回路の抵抗値として電動機の運転を継続し、徐々に速度を上昇してゆく。電動機が加速しセルビウス制御運転が行なえる回転数に達すると、自動的に接触器42が閉路し、また抑制抵抗器が無通電となって電源擾乱の起こる以前のセルビウス制御にもどる。

一方、電源擾乱時の条件が悪く直流回路に過電流が流れ、直流しゃ断器がしゃ断した場合でも、電源電圧回復後の電動機は抑制抵抗器を二次回路に結合して運転を継続する。直流しゃ断器のしゃ断が電源擾乱に起因したものである場合には、自動的に直流しゃ断器の再投入を行ないセルビウス制御運転にもどるように工夫している。

この結果、予想される各種モードの電源擾乱が起こっても、電源が正常に復帰すれば、そのまま電動機が運転を継続できることを確認できた。

インバータ装置のゲートパルスのシフト、及びブロックの

効果は、例えば図7に示すように顕著である。横軸は電源擾乱を受けたときの回転数(%表示)であり、縦軸はインバータのゲートシフトの余裕がなく、転流が失敗し直流過電流が発生した確率である。回転数が低くなるに従って電動機二次回路電圧が高くなるから、インバータ制御での転流余裕が減少してゆく。したがって、回転数低下に従い直流過電流発生の確率が増加するのは当然であるが、この確率を下げる手段としてインバータの交流電圧を若干高目にして転流余裕を増加することもできる。

5 サイリスタ・インバータ制御方式の特長と対瞬時停電特性

5.1 電流形インバータの構成と特長

電流形インバータの代表的な構成例を図8に示す。コンバータ部分、インバータ部分ともサイリスタ純ブリッジで構成されるが、このブリッジの点弧制御により電源と電動機の間でエネルギーの流れの方向を変え、力行回生のいわゆる四象限運転ができるのが大きな特長であるが、更に、

- (1) 電動機は、かご形誘導電動機などブラシレス交流電動機を使用する。また万一、制御装置が不具合の場合は電源に直結すれば非常運転は続行できる。このように万全のバックアップシステムを組むことができる。
- (2) 水中ポンプの制御が可能である。この場合、軸受注油のような保守作業を考えずに済み、また起動時の満水操作が不要のため簡潔なフローが組める。更に、停電などの非常時を含めて、始動・停止時のシーケンス動作が簡単である。

5.2 電流形インバータの対瞬時停電特性

停電は制御装置にとって大きな外乱であり、単なる装置の停止だけでなく適切な考慮が払われなければ装置の破損に至る。

電流形インバータにおいては、停電などの過渡時には次に述べるエネルギーが過電圧・過電流の原因となるので、適切な考慮が必要である。

- (1) 直流回路のリアクトルや電動機巻線に蓄えられた電磁エ

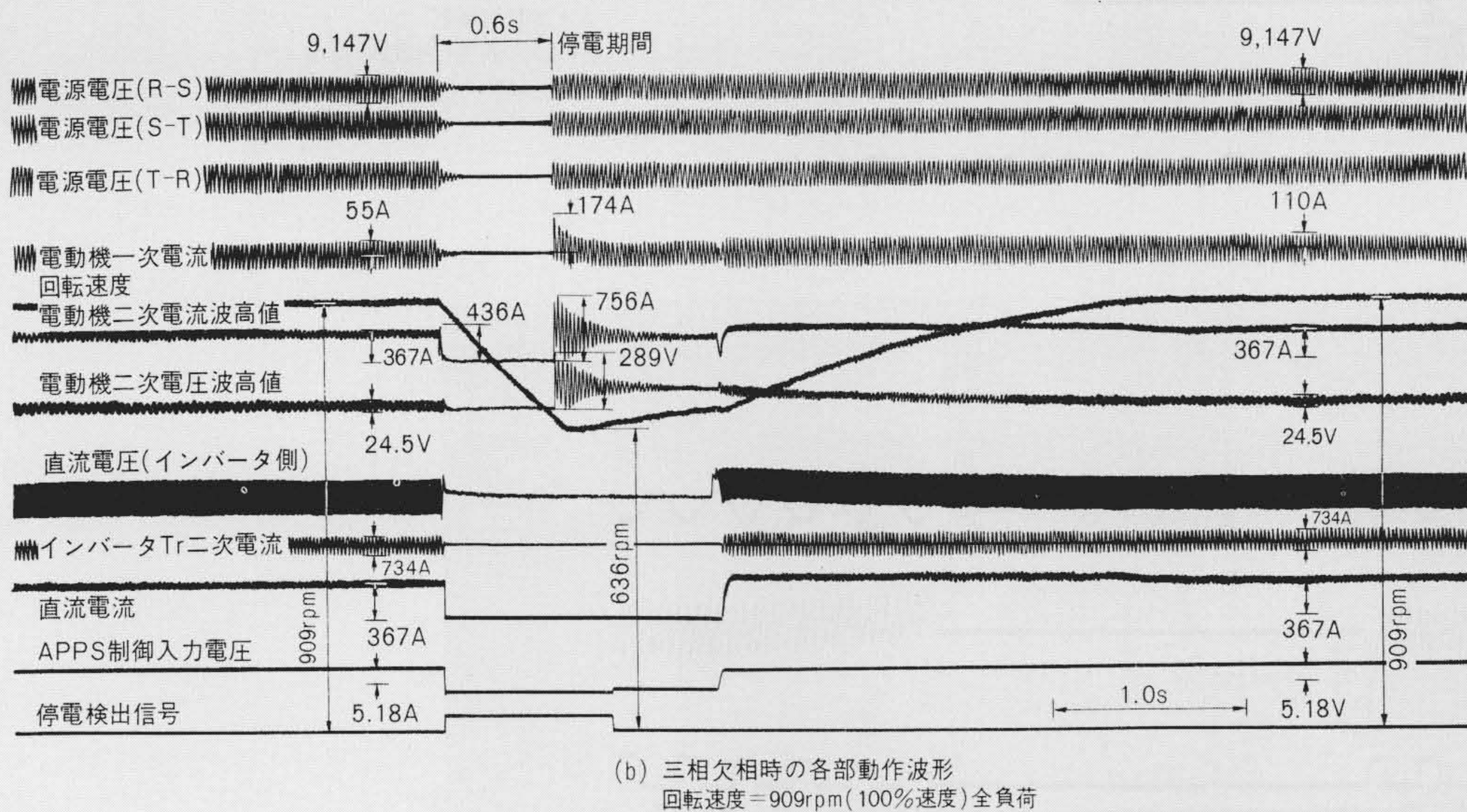
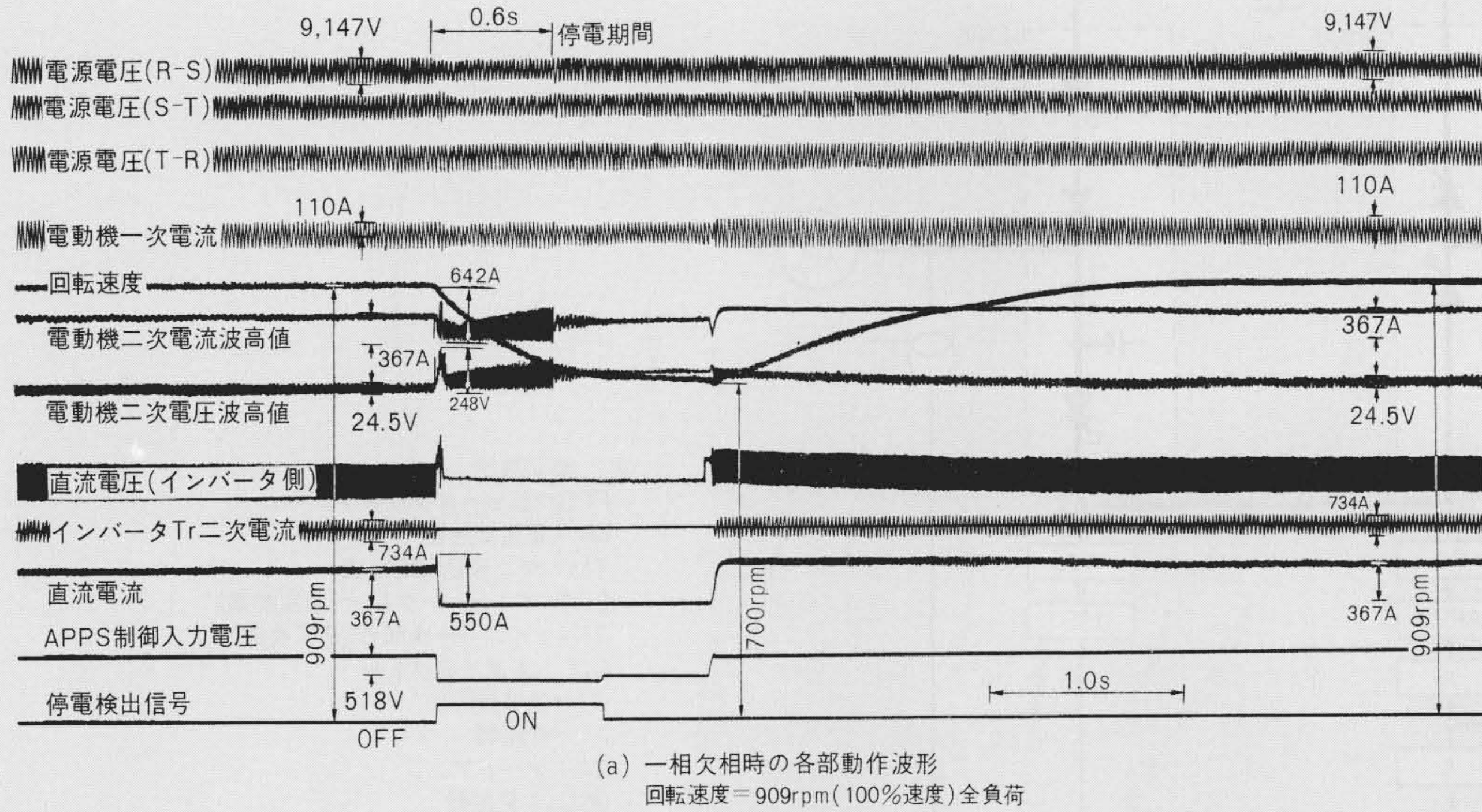


図6 電源擾乱時の現象 電源擾乱を検出し、インバータはブロック動作した結果、過電流が流れなかった。電源電圧回復時、抑制抵抗で運転を続けた後、セルビウス運転に自動的に復帰している。

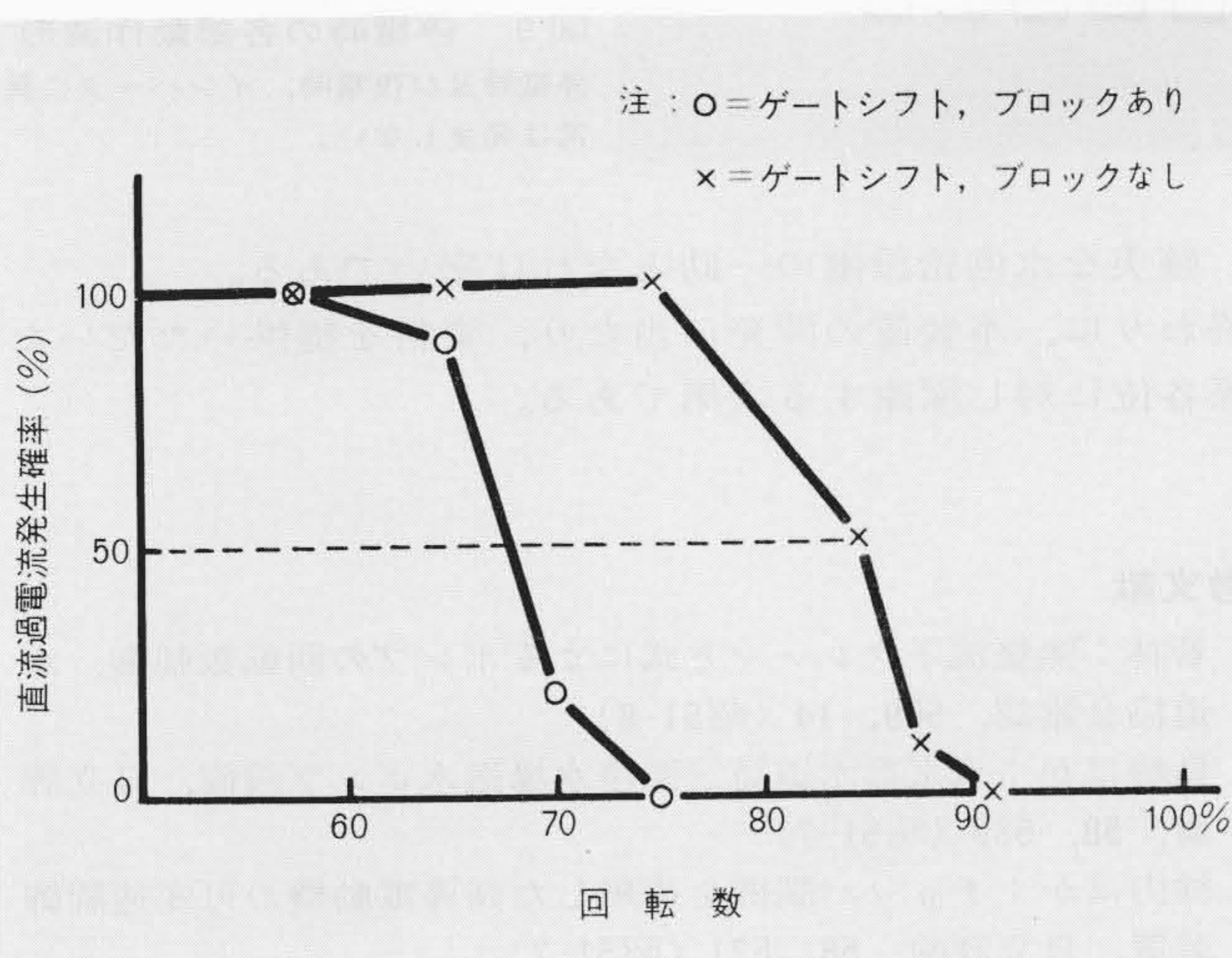


図7 ゲートシフト，ブロックの効果(一相欠相の一例) 電源擾乱を検出してインバータのゲート信号をシフト，ブロックすることにより，直流過電流の抑制に効果がある。

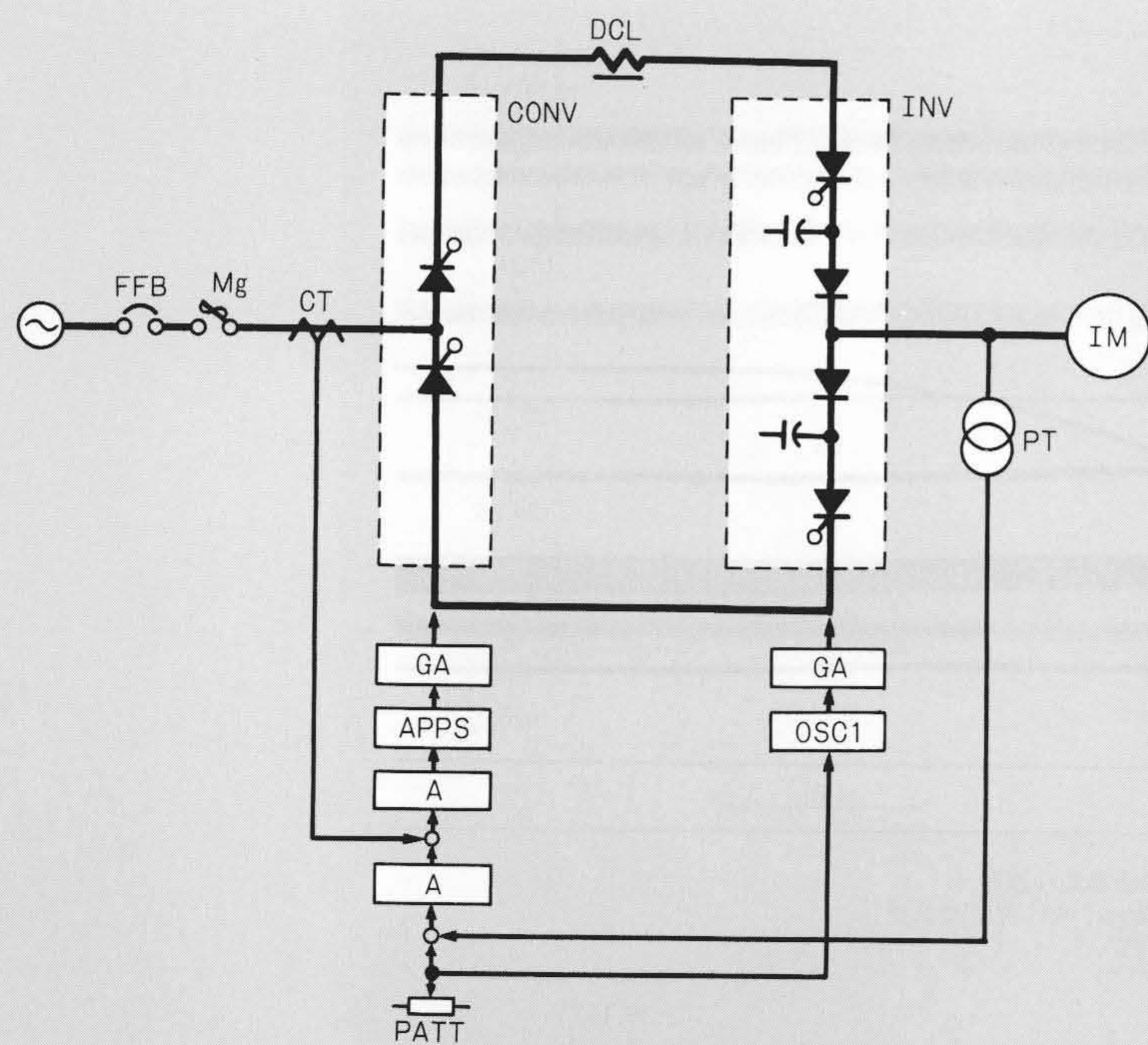
エネルギー

(2) 電動機や負荷に蓄えられた運動エネルギー

このうち前者は、主回路内に巡回する電流の形で存在する。電源や電動機の出入りがなければ、この電流自身は成長せず過電流になることはない。しかし、例えば主回路接触器を動作させ主回路を開くと過電圧を発生する。この大きさは接触器の動作速度、すなわち電流を切る速さに関係する。この不具合を避けるために、回路過電圧又は停電検出とともにコンバータ部のサイリスタを全点弧し、次に電源電圧回復に備えてゲートをシフト・ブロックする移相点弧方式を採用した。この方式によりどんな場合も直流リアクトル、電動機については閉回路の状態を保つことができる。

後者については機械的エネルギーを、停電時には機械的損失により消費させることとした。いま電動機の同期回転数に相当する周波数を f_0 、インバータ周波数を f_1 とすると、 $f_1 \div f_0$ 又は $f_1 = 0$ とすれば電動機からのエネルギー回生はなく、インバータへ過電圧過電流のストレスを与えることはない。

電源電圧回復時は制御回路準備完了とともに主回路を投入



注：略字説明

FFB=ヒューズフリーブレーカ
Mg=電磁接触器
IM=かご形誘導電動機
CONV=コンバータ部分(順変換器)
INV=インバータ部分(逆変換器)
DCL=直流リアクトル
CT=変流器
PT=変圧器
GA=ゲートアンプ
OSC1=発振器
APPS=自動移相器
A=演算増幅器
PATT=速度(周波数)指令

図8 電流形インバータの構成 いったん直流に変換した後、任意周波数の交流電源を作る。

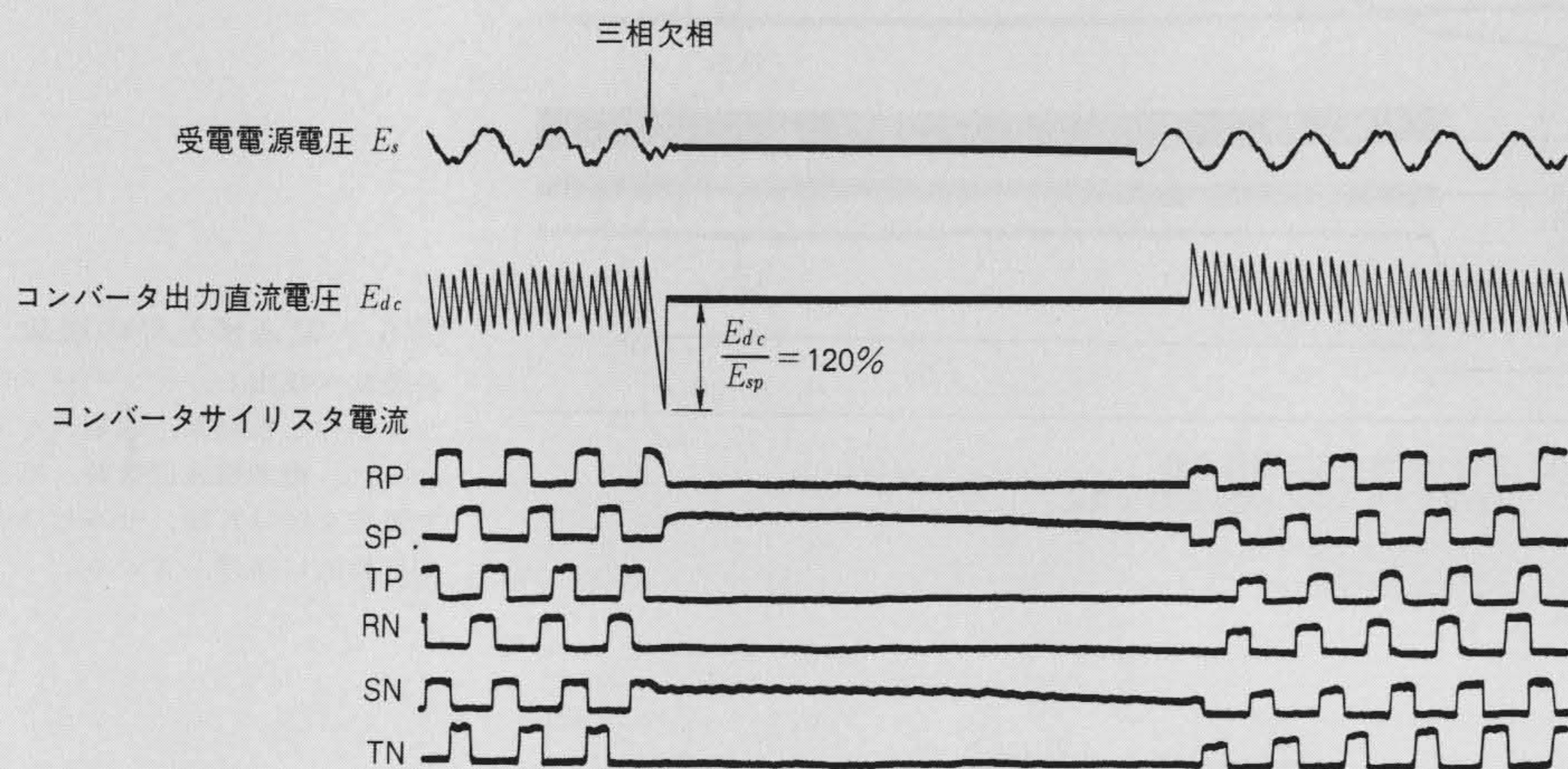


図9 停電時の各部動作波形
停電時及び復電時、インバータに異常は発生しない。

すれば、短絡アームのサイリスタは順次ブロックされ、電流制御ループにより通常の起動順序に従い運転に入る。図9に瞬時停電を与えた場合のオシログラムを示す。この図で停電時、過電圧・過電流は発生せずに電源電圧回復とともに正常な運転に入っていることが分かる。停電時には単純な動作を行なわせることにより確実に電源回復に備えることができる。

6 結 言

サイリスタ制御による可変速度電動機は、ポンプ、ファンなどの駆動用としてエネルギー有効使用の面から特に注目を集めている。電源擾乱に対して弱いという過去のイメージを取り除き、ここに運転に際し信頼性の高い技術開発を得ることができた。

今後、本装置が公共性の極めて高い送水ポンプ用に適用さ

れ、確実な水供給設備の一助となれば幸いである。

終わりに、本装置の開発に当たり、資料を提供いただいた関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 若林：無整流子クレーマ方式によるポンプの回転数制御，水道協会雑誌，509，14（昭51-8）
- 2) 島崎ほか：東京都水道局三園浄水場送水ポンプ設備，日立評論，58，539（昭51-7）
- 3) 神山ほか：チョップ制御を適用した誘導電動機の可変速制御装置，日立評論，58，571（昭51-7）
- 4) 例えば，小西ほか：産業用サイリスタモータ，日立評論，55，618（昭48-6）
- 5) 技術第一研究所報告：電力中研，21（1971-9）