

600MW タービン発電機の半速同期

Half Speed Synchronization of 600MW Turbine Generator

工 藤 悌 二 郎* 葛 貫 壮 四 郎**
Teijirō Kudō Sōshirō Kuzunuki

A half-speed synchronization system has been adopted for the first time for a 600MW cross-compound turbine generator, in place of the conventional turning synchronization system. Described are the synchronization phenomenon of the new system and its effects on the generator.

1. 緒 言

タービン発電機の大容量化が進むにつれ、タンデム機の製作限界の問題、あるいは配置上、運転上の長所などから、クロスコンパウンド機の需要は増大する傾向にある。従来、クロスコンパウンド機では起動時の同期方式として、ターニング速度で同期を行なうターニング同期方式が採用されていたが、最近では半速同期方式を採用する方向にある。

半速同期方式は、従来のターニング同期方式に比べて、

- (1) ターニング同期方式では別置励磁機を必要とするが、半速同期方式は直結励磁機で同期可能なため別置励磁機は不要。
 - (2) 半速同期方式はターニング同期方式に比べ再起動時間を短縮することができる。
- などの長所を有している。

半速同期の方法にはあらかじめ励磁を与えておき、電機子側で強制並列する方法とまず電機子側をつないでおき励磁を投入する方法の二つがある。しかし前者は後者に比べ同期に入るまでの時間を短縮できるという利点はあるが、発電機に与えるショックが非常に大きいため、一般的に採用されておらず、ここでは後者について 600MW 機にて検討した結果を述べる。

2. 計 算 法

計算は Park の基本式⁽¹⁾より得られる。

直軸

$$\Psi_d = -x_d \cdot i_d + x_{ad}(i_{fd} + i_{kd}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\Psi_{fd} = -x_{ffd} \cdot i_{fd} + x_{ad}(-i_d + i_{kd}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\Psi_{kd} = x_{kdd} \cdot i_{kd} + x_{ad}(-i_d + i_{fd}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

横軸

$$\Psi_q = -x_q \cdot i_q + x_{aq} \cdot i_{kq} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Psi_{kq} = -x_{akq} \cdot i_q + x_{kkq} \cdot i_{kq} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ロータ

$$e_{fd} = P \cdot \Psi_{fd} + r_{fd} \cdot i_{fd} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ダンパ

$$0 = P \cdot \Psi_{kd} + r_{kd} \cdot i_{kd} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$0 = P \cdot \Psi_{kq} + r_{kq} \cdot i_{kq} \quad \dots\dots\dots(8)$$

運動方程式

$$M \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_m - T_e \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$T_e = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d \quad \dots\dots\dots(10)$$

以上、10個の方程式にそれぞれ 1Ry, 2Ry 機につき連立方程式をたて初期値を与えればデジタルコンピュータにて数値計算することができる。

注：記号の説明については文献(1)を参照されたい。

3. 半速同期および予熱の手順

600MW 機にて実施した半速同期および予熱の手順につき以下述べる。図 1 は 600MW 機の励磁回路を示したものである。

3.1 起 動 時

起動は図 2 に示す起動スケジュールにより行なわれるが以下詳細に述べる。蒸気経路については図 3 を参照されたい。

- (1) 1Ry, 2Ry 機をつなぐ。
- (2) タービンにて 1Ry, 2Ry 機ともに昇速する。必要なら 1,000rpm にてタービン予熱のみを行なう。発電機の予熱は同期がとれていないため行なわない。
- (3) 回転数を 1,500~2,100rpm の間の任意の回転数に保持する。
- (4) バイパス弁および揃速(せんそく)弁により 1Ry 機と 2Ry 機の回転数差を 5% (75~105rpm) 以内にそろえる。
- (5) 界磁抵抗器 70M-1P, 70M-1S が最大位置にあることを確認する。
- (6) 界磁しゃ断器 41M-1P, 41M-1S を手動で「同時」に入れる。
- (7) 70M-1P, 70M-1S を手動で「同時」に細かく断続的に動かして界磁電流を上昇させる。割合は 20 秒に 1 回程度で、断続的に 60 A / 1 回程度とする。
- (8) 2 分以内に同期がとれ、回転数指示差がゼロとなる。
- (9) 2 分以内に同期がとれない場合にはいったん 41M-1P, 41M-1S を同時に開とし、15 分後に再び同期をとる。

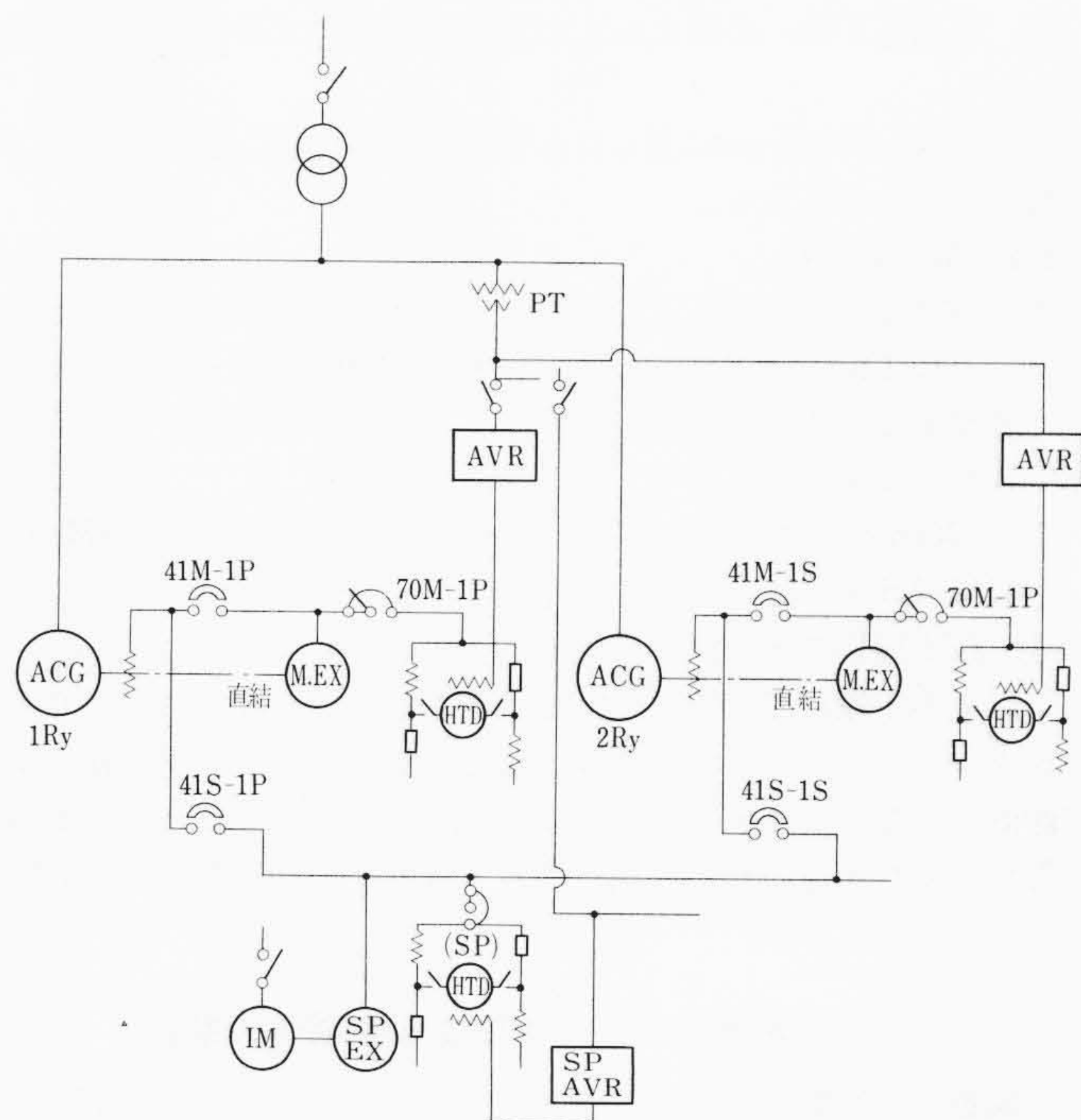


図 1 600MW 機励磁回路図例

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

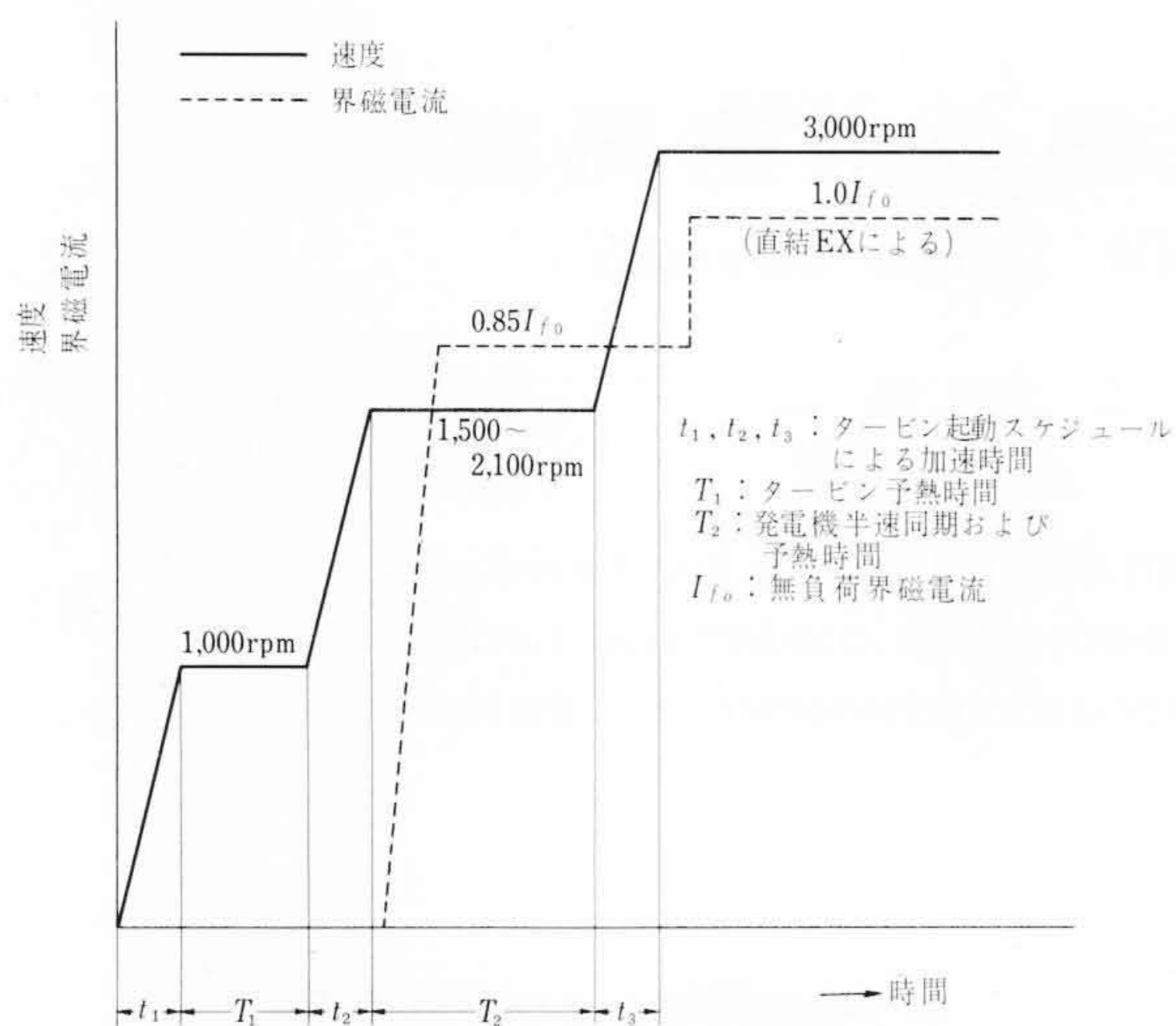


図2 起動スケジュール線図

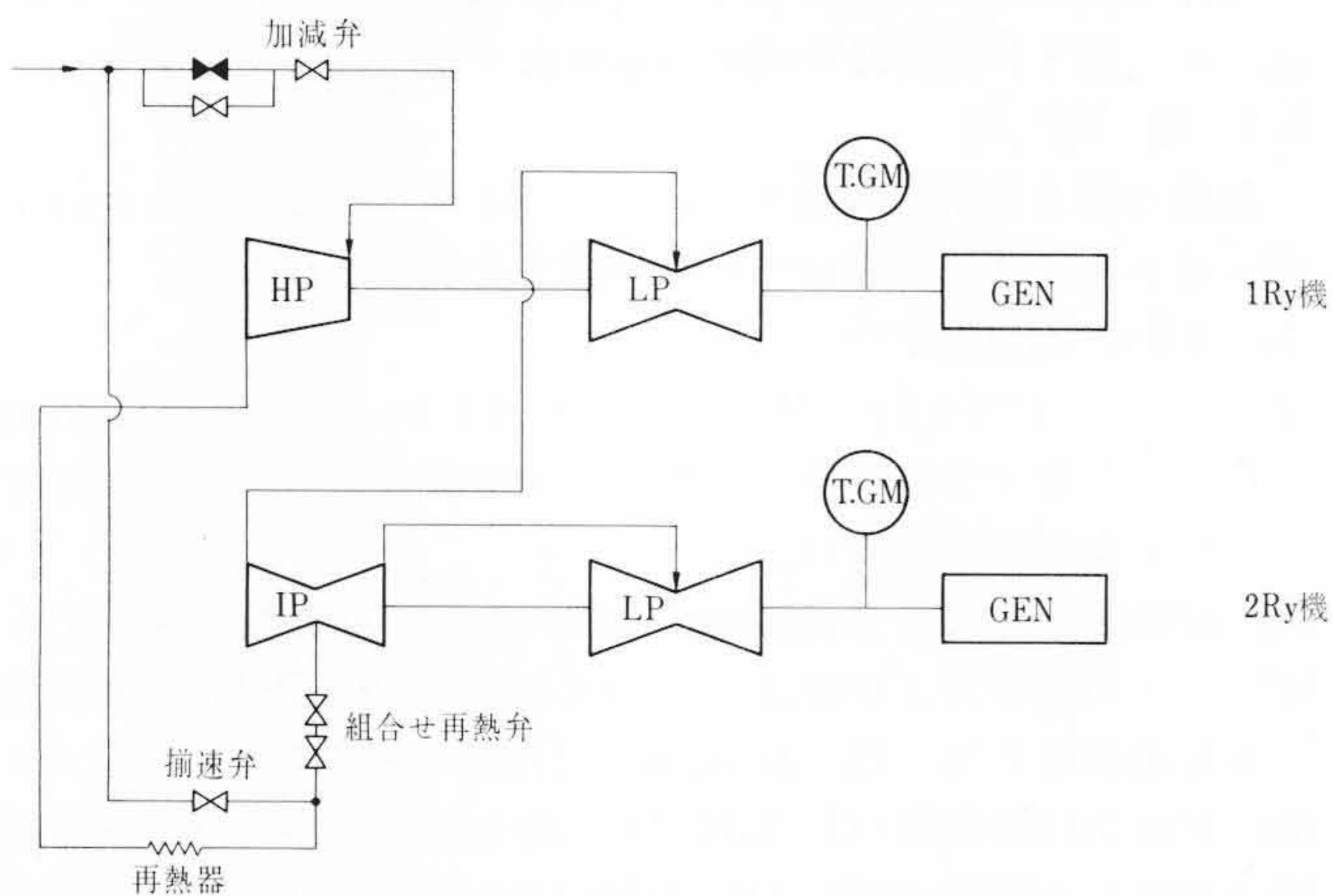


図3 600MWクロスコンパンド機蒸気経路図例

- (10) 同期がとれたときは励磁電流、発電機電流ともハンチングしていないことを確認する。1Ry、2Ry機とも零AVRなることを確認する。
- (11) 励磁機の安定巻線の電流分をAVRからの分に変換し安定巻線を切る。
- (12) 同期完了後、必要ならこのままの回転数で発電機の予熱を行なう。
- (13) 昇速し3,000rpmに達したら界磁電流を調整し定格電圧とする。
- (14) 系統に併入する。

3.2 解列時

- (1) 解列後、回転数低下時には無負荷界磁電流の85%を越えないように1Ry、2Ry機とも70M-1P、70M-1Sを「同時」に手動調整する。ただし、回転数の低下とともに抵抗値を「同時」にしないで少なくしてゆく。
- (2) 800rpmまで同期を保ちつつ減速して、800rpmにて41M-1P、41M-1Sを同時に開とする。
- (3) 以下同期のとれない自然減速とする。

以上の手順にて行なった実地試験と前述した計算法によりデジタルコンピュータにて計算した結果を比較したのが図4および図5である。実測値と計算値はほぼ一致していることがわかる。したがって半速同期の現象に関しては前述した計算法で十分解析できるといえる。

4. 各種パラメータによる同期への影響

同期への影響を与えるパラメータとしては、回転数、1Ry、2Ry機の回転数差、初期相差角、励磁量、インプットトルクなどが

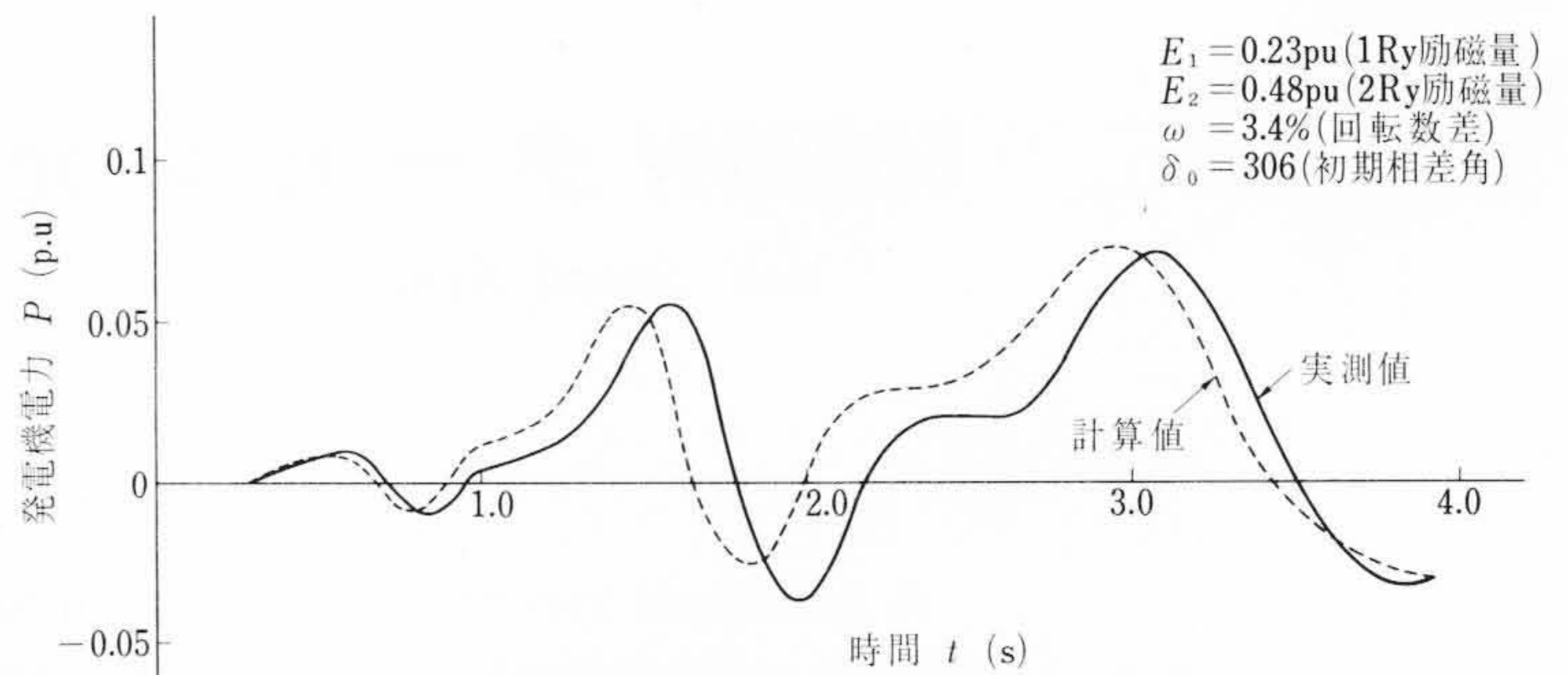


図4 有効電力変動曲線(実測と計算値の比較例)

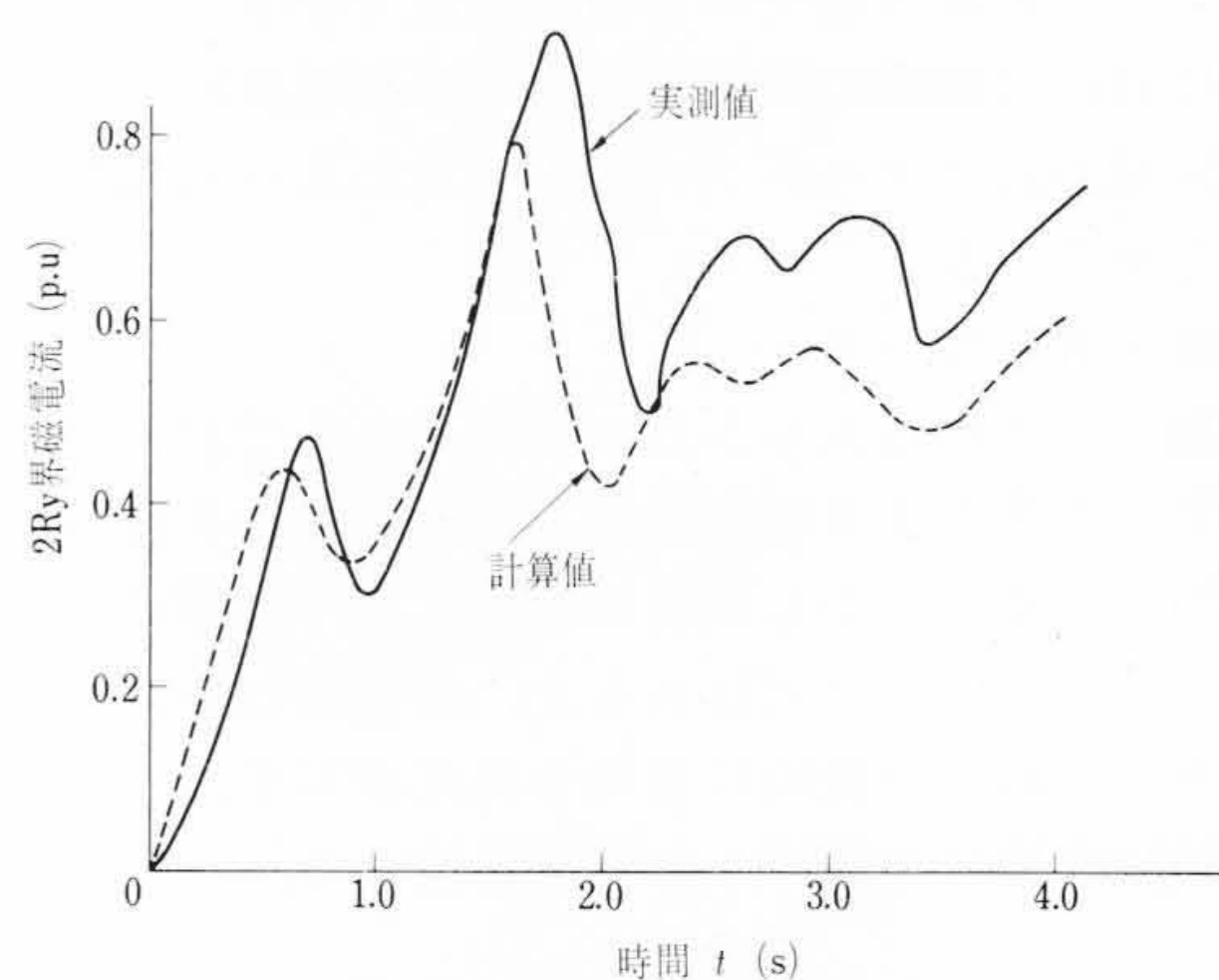
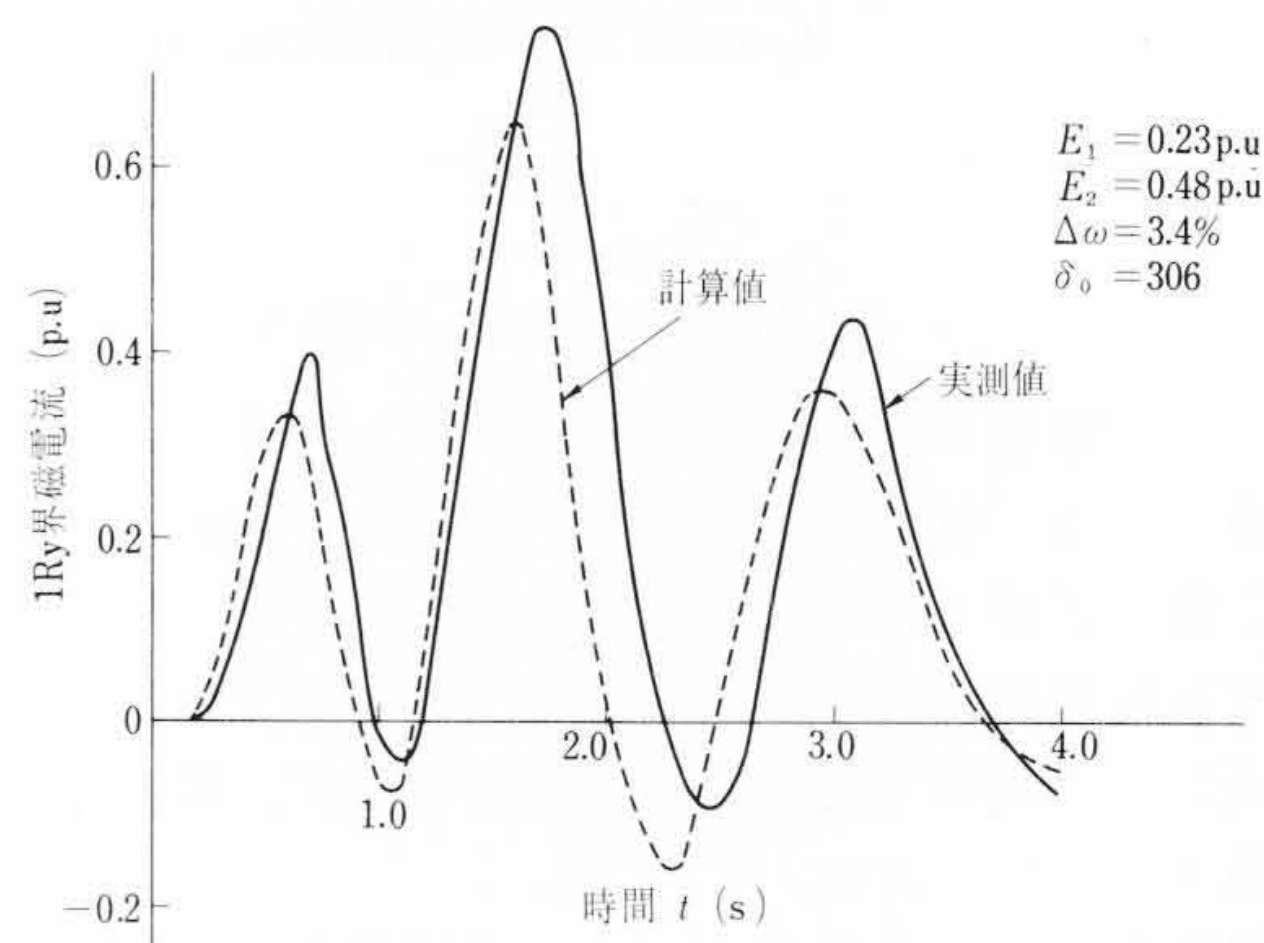


図5 界磁電流変動曲線(実測値と計算値の比較例)

あるが、これらの同期化現象に及ぼす影響につき述べる。

4.1 初期相差角による影響

図6は初期相差角をパラメータとした時間と相差角(1Ry機と2Ry機の相差角の差)の関係を示したもので、同図によれば初期相差角 δ_0 が小さいほど相差角が最大になる時間が遅れる。つまり、わずかではあるが初期相差角が小さいほど同期するまでの時間が遅れる傾向にあるが、いずれも7極対程度のすべりで、しかもほぼ同じ相差角で同期している。したがって初期相差角の大小は同期しやすさにはあまり関係なく位相のチェックはやらなくとも問題はない。

4.2 励磁量による効果

図7は励磁量による同期可能範囲を示したもので、図中には比較のためターニング同期時の同期可能範囲をも合わせて示してある。若干計算条件は異なっているが、半速同期方式のほうが同期可能範囲は広がっている。これは半速同期方式では回転のエネルギーが大きいために励磁量が少なくすむが、ターニング同期のような低速同期では、電機子巻線抵抗の影響により、同期化力が小さくなり、励磁量を多く必要とするためである。このことから半速同期の優位性がうかがわれる。

4.3 回転数(同期速度)および回転数差による影響

図8は回転数をパラメータとした相差角変動曲線の一例を示し

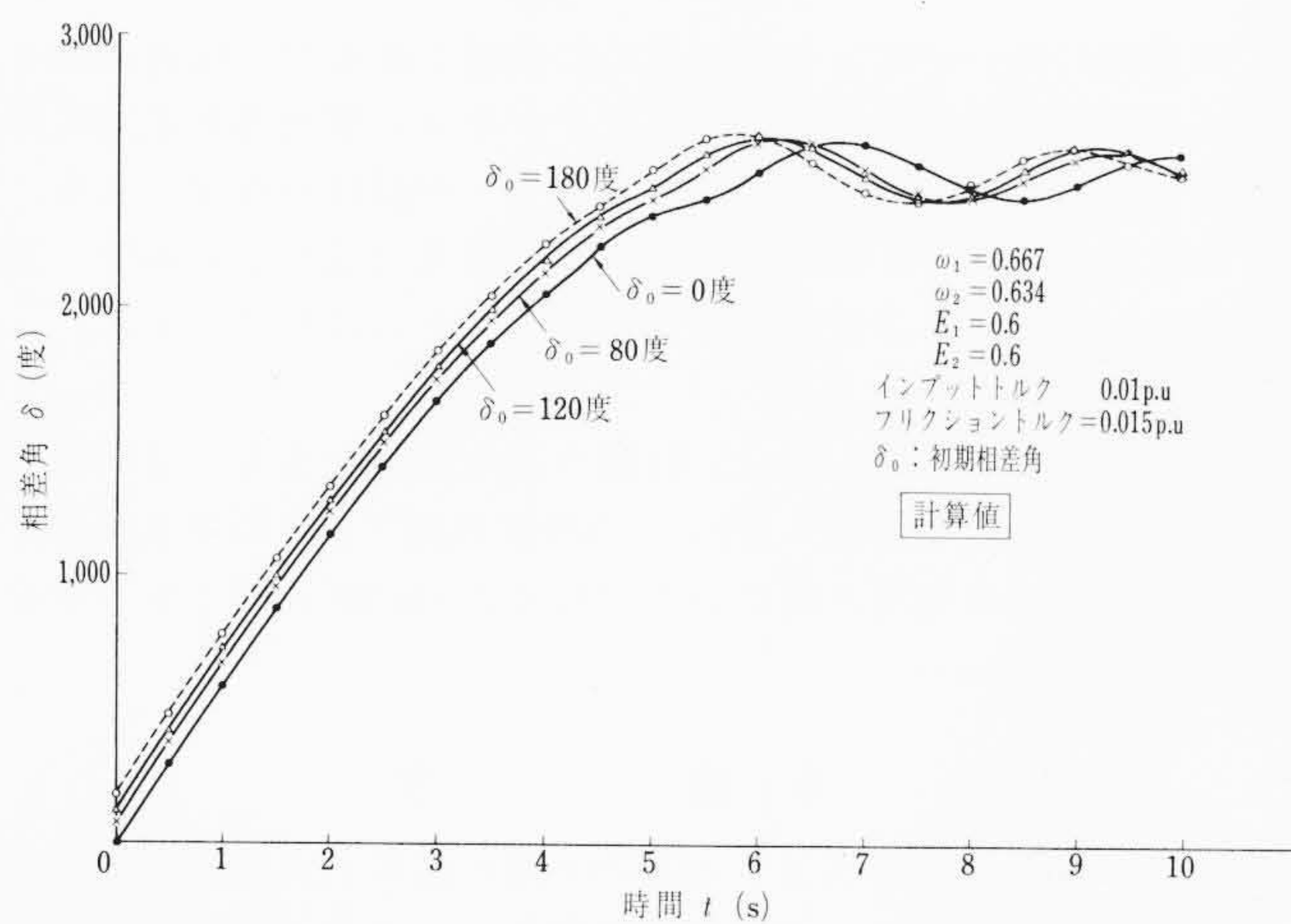


図6 初期相差角をパラメータとした相差角変動曲線の一例

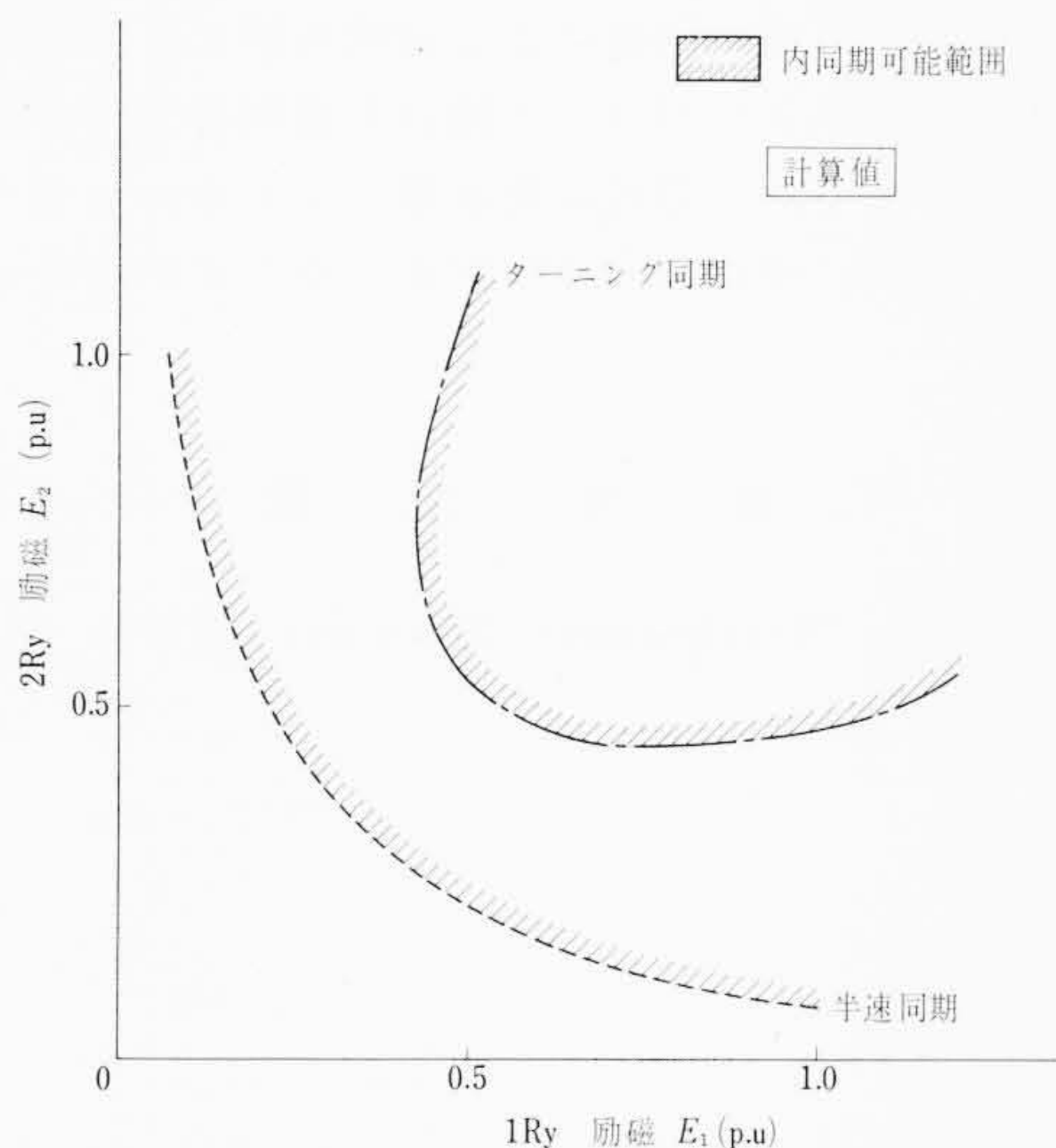


図7 励磁量による同期可能範囲

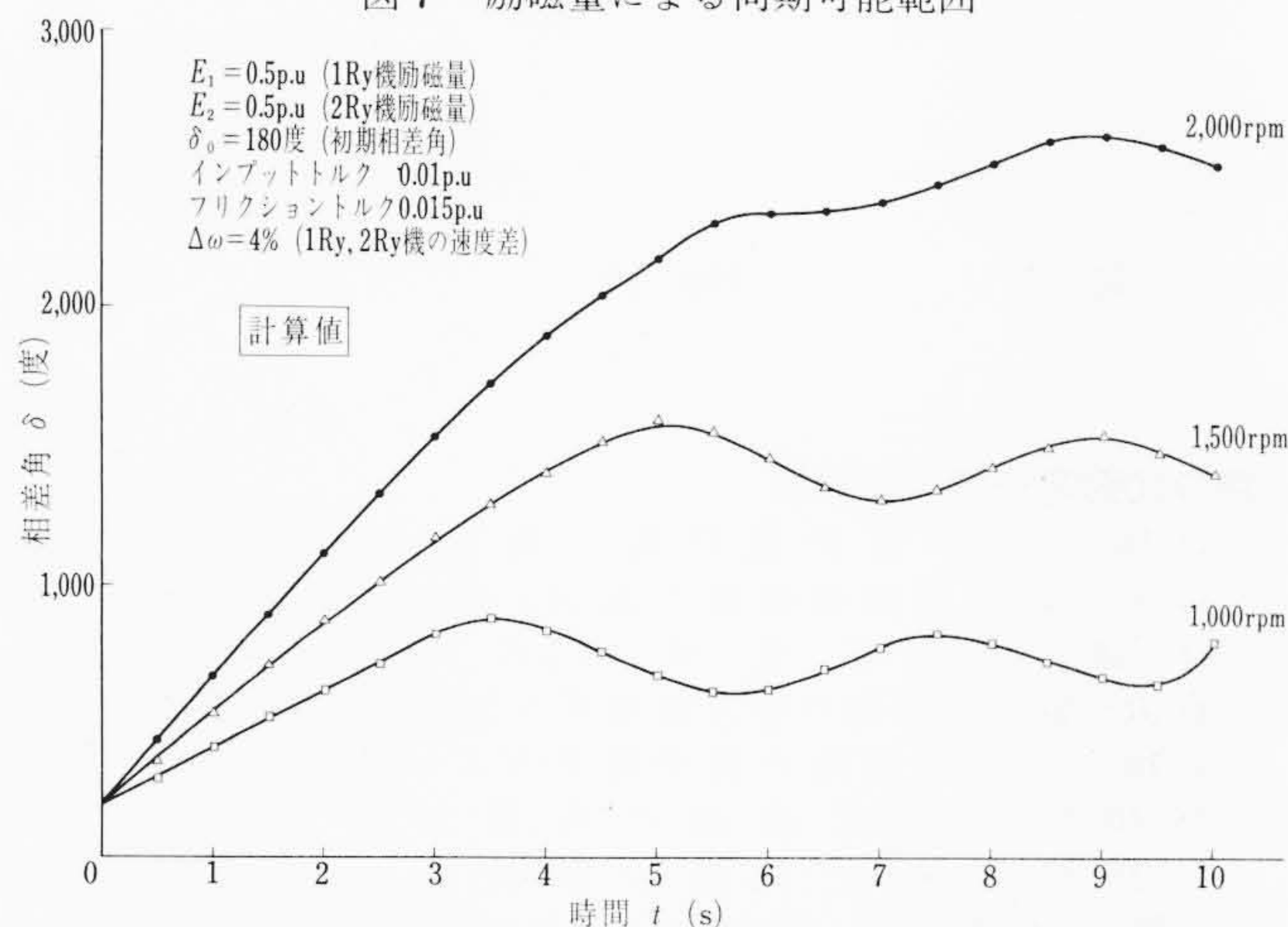


図8 回転数(同期速度)をパラメータとした相差角変動曲線の例

たものである。回転数差を一定とした場合には、電機子巻線の抵抗の影響を無視できる範囲内では回転数の低いほうが同期に入りやすい。これは当然のことながら電氣的な結合力に対して回転エネルギーが大きいため、回転数が大きいほどポールが多くすべるためである。したがって同期突入上は同期速度の低いほうが有利であるが、前述したように半速同期のメリットは再起動に要する時間を短縮できるという点にあるので、発電機に与えるショックが許容値内であり、かつ発電機およびタービンの危険速度を避けうるならば、半速同期の利点を発揮できる高速で同期を行なうべきである。また最低同期速度は直結励磁機によって励磁しうる回

転数によって決定される。本 600MW機では余裕を考慮して半速同期速度を1,500~2,100rpmとした。

また1Ry, 2Ry機の回転数差は小さいほど同期に入りやすいが、タービンの揃速の関係上回転数差は5%以下が妥当である。

4.4 インプット・トルクによる影響

インプット・トルクが大きすぎると同期化しにくくなる。

5. 発電機に及ぼす影響

同期に入るまでは非同期運転となるため、発電機には異常電流、異常トルクが発生するので、機械的な強度が問題となるが、特に次のものが考えられる。

- (1) 軸トルクによるジャーナル部ねじり応力
- (2) キーバーに加わる応力
- (3) 電機子コイルエンドの応力および変位
- (4) ブッシングの振動
- (5) 発電機軸のねじり固有振動数

したがってクロスコンパウンド機で半速同期を行なう場合にはこれらの点を十分に考慮して設計を行なう必要がある。ここでは代表的な例としてジャーナル部のねじり応力、キーバー応力、電機子コイルエンドの応力および変位について述べる。

(1) 軸ねじり応力

軸伝達トルクは、発電機エアギャップに生ずる電気トルクを駆動力とし、タービンと発電機の回転子をねじり振動系として求める。このとき応力が最も高くなるのは発電機タービン側のジャーナル部であるが、通常発電機をベースロードとして使用する場合には発電機の一生に受ける繰返し数は約 3,000回程度であり、毎日、起動、停止を行なう場合には 10^5 回程度である。したがってこの部の応力は低サイクル疲労ベースで考える必要がある。600MW機に使用した軸材の許容ねじり応力振幅と半速同期時に受ける応力振幅は図9に示すとおりである。許容値に対しては十分に余裕があり、600MW機程度の発電機では毎日起動、停止を行なっても軸の強度上はなんら問題はないといえる。

(2) スプリングバー応力

発電機鉄心の振動が、直接フレームに伝わらないようにするため、鉄心はスプリングバーと称するばね作用のある鉄鋼はりによって、フレームにサポートされている。エアギャップに発生する電気トルクはこのスプリングバーを通して基礎に伝達されるため、スプリングバーには振動的な駆動力が加わり、繰返し曲げ応力を受けることになる。スプリングバーに加わる応力とスプリングバー軸材の疲労限界は図10に示すとおりである。

600MW機では十分な余裕があり、応力的には問題ないといえる。

(3) 電機子コイルエンドの応力および変位

同期投入時の異常電流により、電機子コイルエンドは異常な

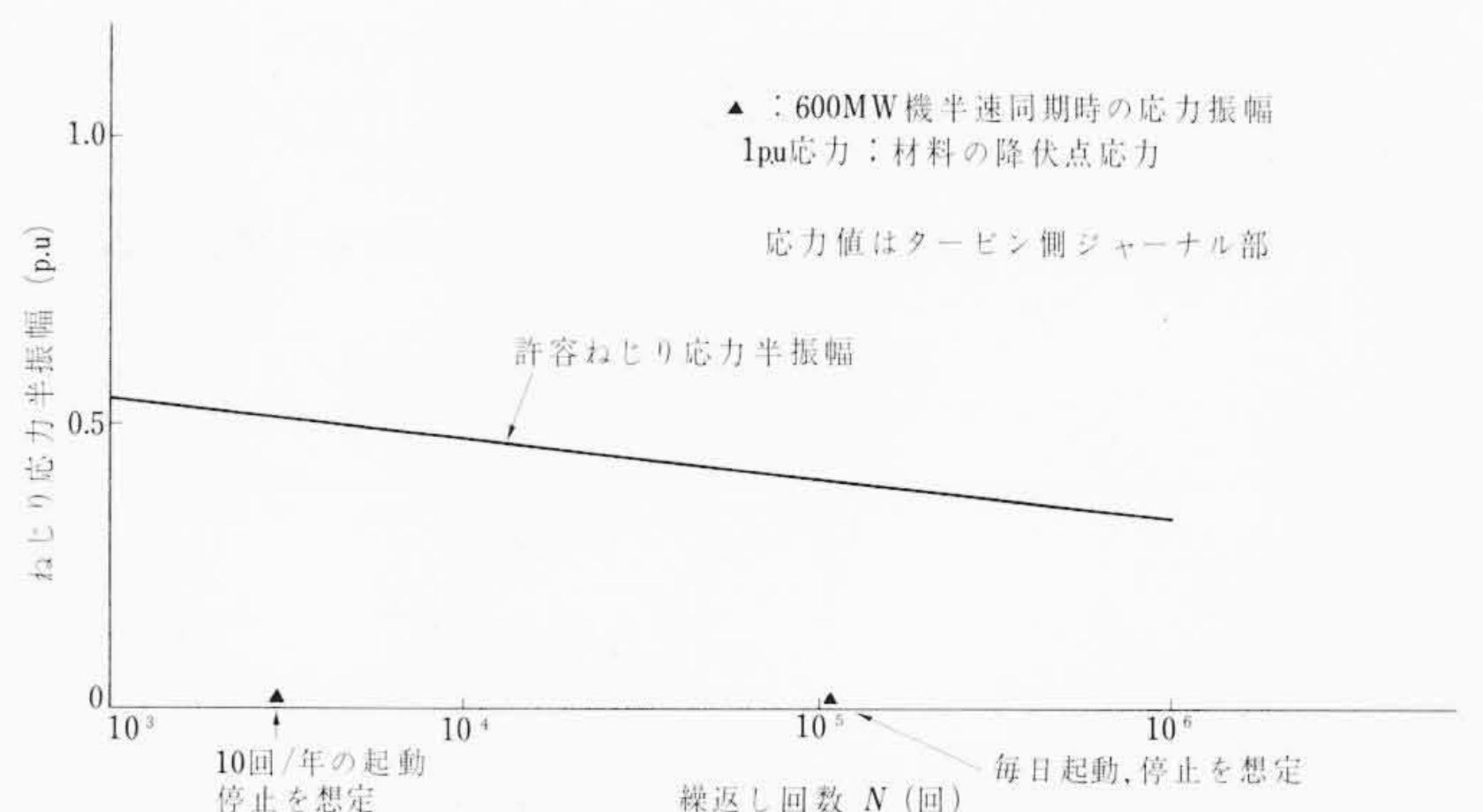
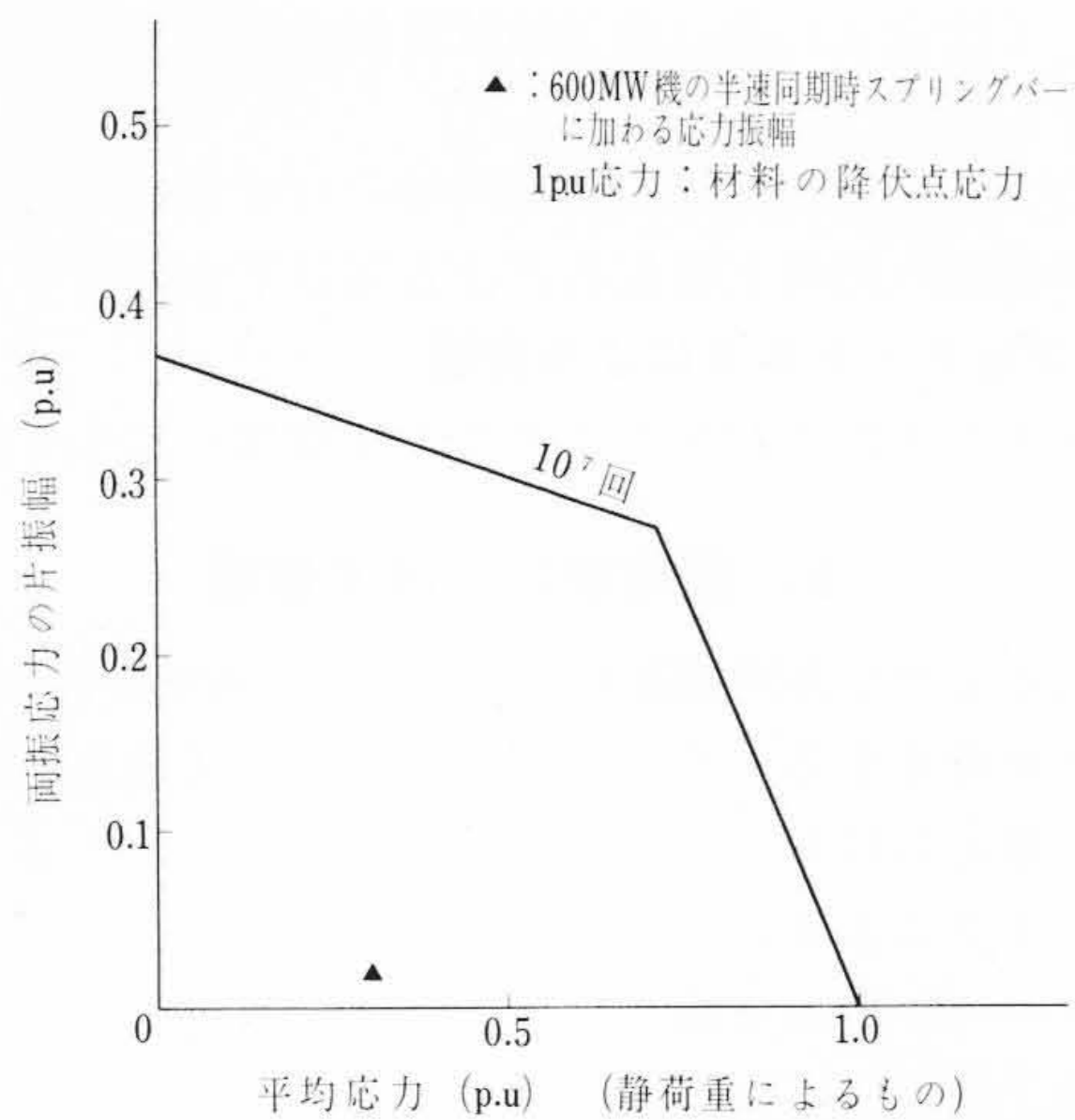


図9 600MW機 発電機軸許容ねじり応力半振幅曲線

図10 スプリングバー疲労限界図 (10^7 回)

電磁力を受けるのでコイルの応力および変位が問題となるので、コイルエンド端部の強度は十分に考慮されなければならない。

(4) コミュテータレス励磁方式の場合

いままで述べてきたのは直結直流励磁機を使用する場合であるが、今後発電機の大容量化をたどるにつれ、クロスコンパウンド機においても励磁方式としてコミュテータレス方式を採用する方向にあり、この場合同期投入時1 Ry, 2 Ry機の励磁量が異なると図5に示すように界磁電流が負となりうるケースが考えられる。負の界磁電流はシリコン整流器にブロックされて界

磁巻線に高い逆電圧を加えるので問題となるが、保護装置としては常時の抵抗損失低減の意味でシリコン整流器と並列に非直線抵抗を入れた並列回路またはクローバ回路が有効である。また励磁量を同一とすれば、負の界磁電流は流れないので、運転操作に注意すれば逆電圧の発生防止にさらに有効である。

(5) 逆相電流

半速同期時には1 Ry, 2 Ry機の世界速度差最大5%で2分程度の非同期運転となるが、 $I_2^2 t = 1.0$ 程度以内であるので水冷却タービン発電機に適用されている制限値 $I_2^2 t \leq 10$ 以内であり十分の余裕がある。

6. 結 言

以上、600MWクロスコンパウンド機に採用した半速同期の同期化現象、発電機に与える種々の影響について述べた。従来のターニング同期方式に比べ半速同期方式は、再起動時間の短縮、同期可能範囲の広さ、直結励磁機による同期可能などの優位性を持つため、今後のクロスコンパウンド機は半速同期方式を採用する方向に移行しつつある。本方式は発電機に与えるショックも比較的小さく毎日の起動、停止にも十分耐えうることがわかった。

参 考 文 献

- (1) C. Concordia Synchronous Machines 8ほか (1951)

Vol. 54

日 立 評 論

No. 11

目 次

■ 論 文

- ・海水揚水発電用機器の電気防食
- ・新形転換炉炉心圧力管群振動実験研究開発
- ・15,500kW四極巻線形誘導電動機
- ・並列冗長サイリスタCVC Fインバータ
- ・2/3インチ静電集束ビジコン8929の開発
- ・東京駅地下乗入車用ATC装置

■ D10形電子交換機特集

- ・D10形電子交換機特集の発行にあたって
- ・わが国の自動交換技術の過去、現在および将来
- ・D10形電子交換機の方式概観
- ・D10形電子交換機の中央処理系および入出力系装置
- ・D10形電子交換機の通話路系および付帯系装置
- ・D10形電子交換機の実装および部品
- ・D10形電子交換機の交換プログラム
- ・商用期における電子交換機用プログラムのサポートシステム

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内一丁目5番1号

郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

郵便番号 101

振替口座 東京 20018番