

圧延機用 2 セット直列接続サイリスタ静止レオナード装置の ゲート・パルス制御および無効電力減少制御

Gate Pulse Control and Reactive Power Reduction Control with 2-Set
Series Connected Thyristor Static Leonard System for Rolling Mills

小 西 務*
Tsutomu Konishi

要 旨

わが国において他に例をみない一貫したアルミニウム圧延設備用電源として、いま製作中の総容量約 14,000 kW のサイリスタ変換器を含む電気品のうちで、熱間仕上圧延機駆動用のサイリスタ静止レオナード装置 2,900 kW は容量的にわが国の記録品であり、2 セット直列接続方式を採用しており高度のサイリスタ制御技術が駆使されている。種々の問題点のうち本報では 2 セット直列接続サイリスタ変換器のゲート・パルス分配制御、および無効電力減少制御について考察し、問題点を解決し、試作装置による実験の結果、所望の性能が得られたことを述べる。

1. 緒 言

従来の圧延機運転用静止レオナード装置には水銀整流器が用いられていた⁽¹⁾。ところが、近年シリコン制御整流素子（以下サイリスタという）の容量増大、直並列運転技術の向上、保護方式の確立および高効率があいまって、大容量の静止レオナード装置にもサイリスタ変換器が採用されるようになってきている⁽²⁾。

現在、この種装置の大形品は外国で稼働中のものがあるが⁽³⁾、サイリスタ変換器の 2 セット直列接続方式としてはいま製作中の装置が世界的にも数少なく、国内では記録品である。

本報では 2 セット直列接続サイリスタ変換器に関する技術的問題点のうち、特に主回路におけるゲート・パルス分配および無効電力減少制御について検討している。これら装置の動作原理、回路構成および実験結果についてとりまとめ報告する。

2. 2 セット直列接続サイリスタ変換器主回路

サイリスタ変換器および直流電動機を 2 セットずつ交互に直列接続して使用すると、電動機の負荷平衡が保たれ、サイリスタおよび直流電動機 1 セット当たりの電圧は全電圧の 1/2 ですみ、また両セットの交流電源電圧に 30 度の位相差を作ることにより 12 相効果を

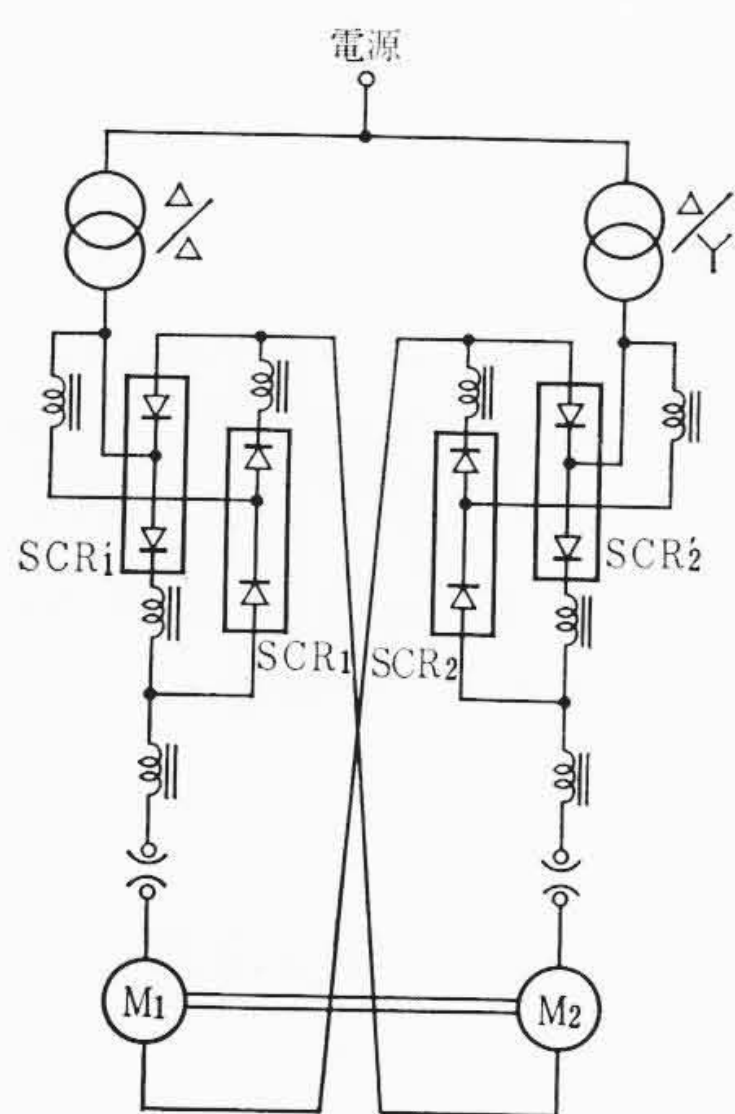
出すことができる。なお、次章で取り扱うように無効電力減少制御を行なうことができる。しかしながら、両セットは独立して位相制御されるので、電動機の負荷条件により主回路電流が断続すると電流を継続して流せなくなる。したがって、両サイリスタ変換器のゲート・パルス分配方法が問題となる。

2.1 ゲート・パルス分配方法の考察

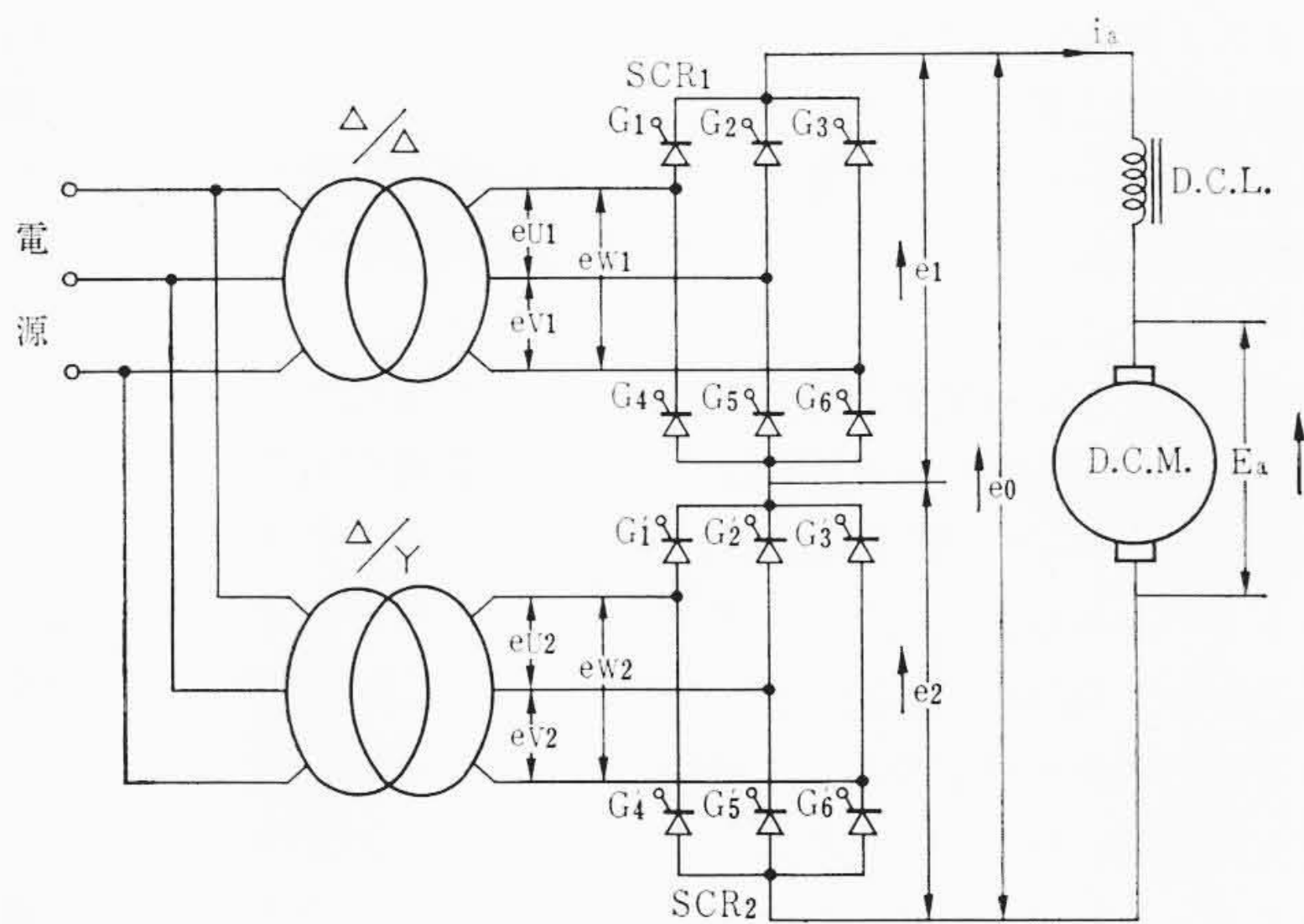
主回路は図 1 (A) に示すように互いに逆並列接続されたサイリスタ変換器および直流電動機がそれぞれ 2 セットずつ直列接続されているが、ここでは図 1 (B) に示すように正接続側だけに着目し、負荷として直流電動機 1 台の場合について考察する。

いま、主回路電流 i_a が断続する場合を考える。このような場合に、サイリスタ変換器 SCR₁ および SCR₂ に普通の 3 相全波制御のときと同様なゲート・パルスの与え方をしたのでは、常に主回路に電流が流れるとは限らない。なぜならば、SCR₁ および SCR₂ のゲート・パルスは互いに独立に与えられているから、必ずしも両サイリスタ変換器のパルスが同一時刻に与えられるとは限らない。したがって、たとえある時刻に SCR₁ にゲート・パルスが与えられても、SCR₂ にゲート・パルスが与えられないならば、電流断続時に SCR₂ は開回路状態を呈するので、主回路電流を流すことができない。

したがって、もしある時刻に SCR₁ にゲート・パルスを与えるな



(A) 実際の単線結線図



(B) 検討に用いる構成図

注) e_0, e_1, e_2 は瞬時値を表わす

図 1 2 セット直列接続サイリスタ静止レオナード主回路

* 日立製作所日立研究所 工博

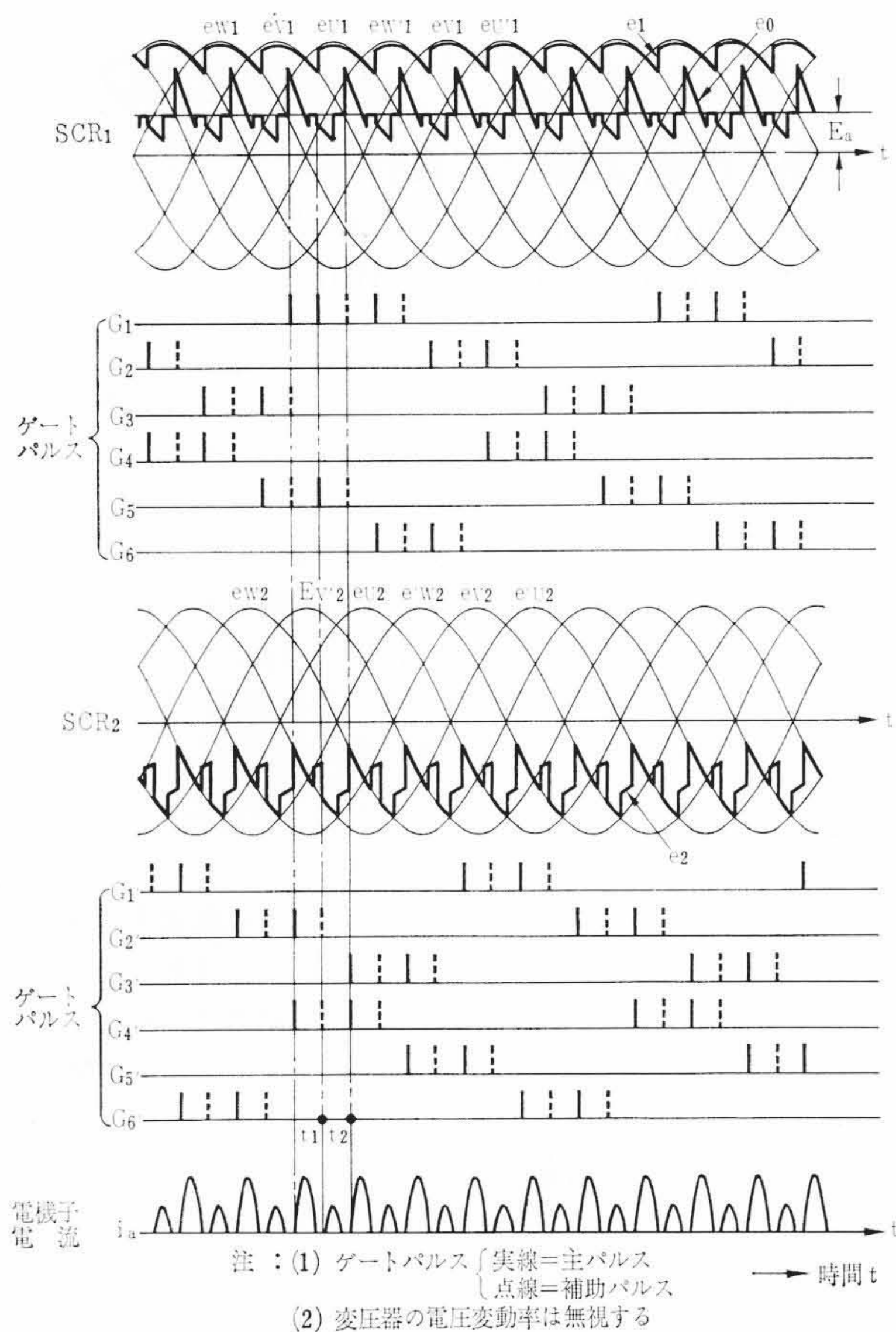


図 2 2 セット直列接続サイリスタ変換器の点弧波形

らば、同時に SCR₂ にもゲート・パルスを与える必要がある。この場合、SCR₁ に与えるゲート・パルスを主パルス、SCR₂ のゲート・パルスを補助パルスという。補助パルスはこの場合のように SCR₂ にだけ必要なのではなく、SCR₂ に主パルスが与えられる場合には、同時に SCR₁ に補助パルスが必要である。ただし、補助パルスはどのサイリスタ素子に与えてもよいというわけではない。

SCR₁、SCR₂ の変換状態に制約はないが、いま一例として SCR₁ が順変換動作、SCR₂ が逆変換動作をしていて、主回路電流が断続している場合の整流回路の交流電圧波形、SCR₁ の出力電圧波形 e_1 、SCR₂ の出力電圧波形 e_2 、2 セット直列接続 SCR 出力電圧波形 e_0 、およびそれぞれのサイリスタ変換器の主パルスおよび補助パルス、主回路電流波形 i_a の概形を示すと図 2 のようになる。同図からわかるように、主パルスが与えられたサイリスタ素子は、その後 60 度の期間が補助パルスの印加期間であることがわかる。この期間をそのサイリスタ素子の責任角ということにする。

この場合、後述するように無効電力減少制御が行なわれるので、たとえば SCR₁ のゲート点弧角が一定、SCR₂ のゲート点弧角が可変として運転される。したがって、図 2 に示すように、SCR₁ のサイリスタ素子のゲート・パルス G_1 および G_5 が常に SCR₂ のサイリスタ素子のゲート G_2' および G_4' に与えられるとは限らない。SCR₂ の変換器が要求される出力電圧を発生するのに必要な点弧角で運転しているとき、たとえば SCR₁ のサイリスタ素子のゲート G_1 および G_5 に与えられているゲート・パルスは、SCR₂ のサイリスタ素子のうち、そのゲート・パルスを責任角にもつサイリスタのゲート G_2' および G_4' に補助パルスが与えられなければならない。

以上の事からは SCR₁ および SCR₂ のどのサイリスタ素子についてもいえることである。したがって、一つのサイリスタ素子に着目すると図 2 に示すように主パルスおよび補助パルスを合計して最

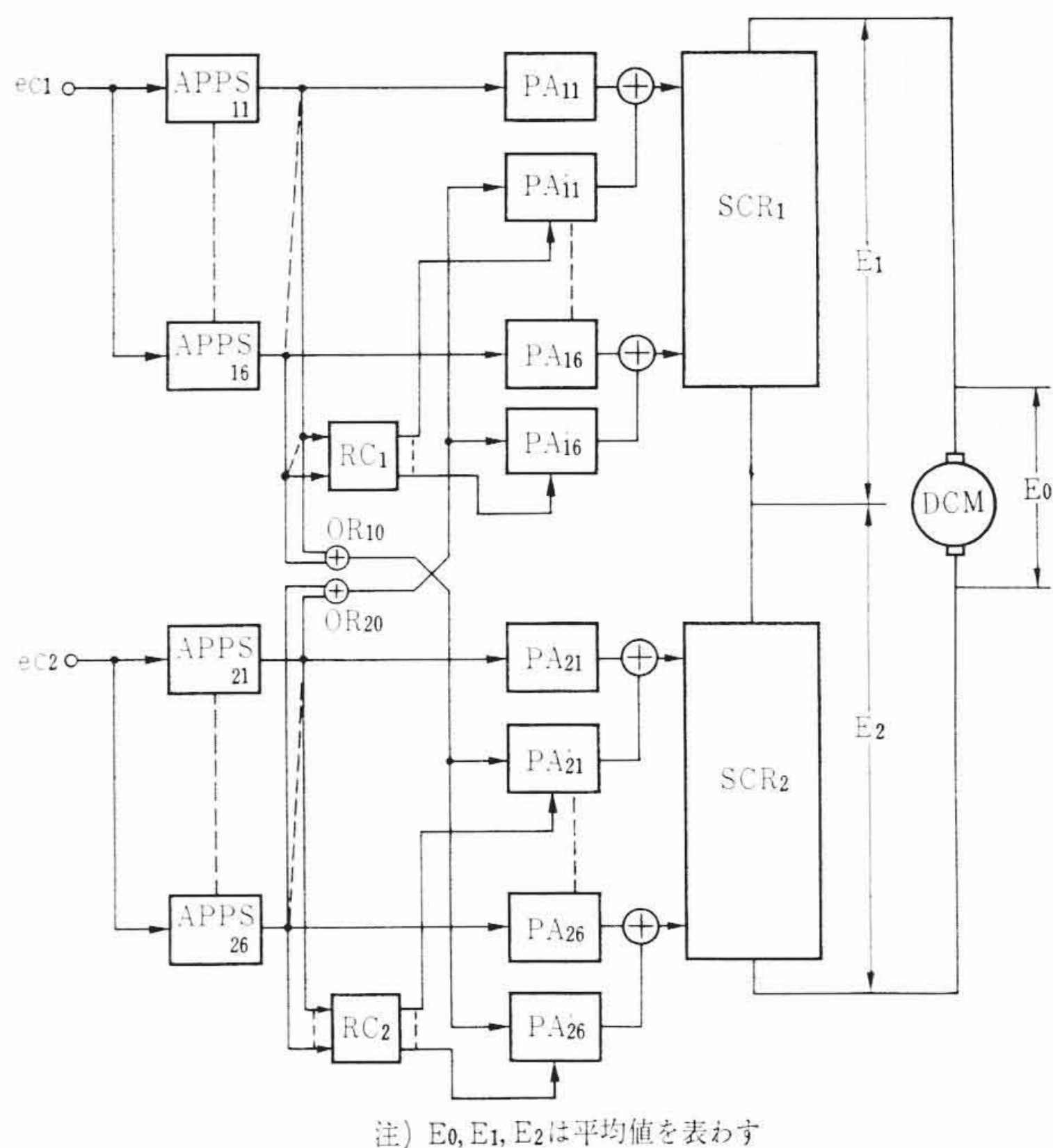


図 3 パルス分配回路の構成図

大 4 個のゲート・パルスが与えられることになる。

2.2 ゲート・パルス分配回路

2.2.1 構 成

従来の 3 相全波制御回路に用いられている主パルス供給用のゲート・パルス分配回路のほかに、補助パルスを供給する回路が必要である。ただし、補助パルスは主パルスが与えられて 60 度以内、すなわち責任角に供給しなければならない。したがって、責任角内のパルスを判断して補助パルスを与える回路が必要となる。

以上を考慮して、2 セット直列接続サイリスタ変換器のゲート・パルス分配回路を示すと図 3 のようである。同図には正接続側だけの構成が示されているが、逆接続側も全く同様であるので省略してある。

2.2.2 動作原理

図 3 において、制御入力電圧 e_{c1} の値に応じて、ある時刻 t_1 (図 3 参照) に APPS₁₁ がパルスを発生したとすると、そのパルスは PA₁₁ により増幅されて、SCR₁ のサイリスタ素子 1 および 5 に与えられる。同時にリング・カウンタ RC₁ によりパルス・増幅器 PA_{11'} のゲートが開く。この 60 度のゲート期間内に、もし制御電圧 e_{c2} に応じた時刻 t_2 に APPS₂₄ がパルスを発生したとすると、そのパルスは、SCR₂ のサイリスタ素子 2 および 4 に PA_{24'} を通じて主パルスが与えられると同時に、OR 回路 OR₂₀ を通じて PA_{11'} ~ PA_{16'} に与えられる。このとき PA_{11'} のみゲートが開かれているから、それを通し補助パルスが SCR₁ のサイリスタ素子 1 および 5 に再び与えられる。

以上、特定の APPS に例をとって主パルスの与え方、および補助パルスのやりとりを説明したが、同様のことは他の APPS についてもいえることであるので、これ以上の説明は省略する。

3. 無効電力減少制御

普通の 1 セットのサイリスタ変換器では、ゲート制御に基づく電流の遅れおよび転流の重なり角により無効電力を生ずる。これが交流回路に電圧降下を発生するので設備が大形になると問題となる。無効電力を減少させるためのサイリスタ変換器の接続方法には種々考えられるが、圧延機駆動用主電動機のように、二重電機子構造のものや、2 台の直流電動機を直結して使用するときにはサイリスタ

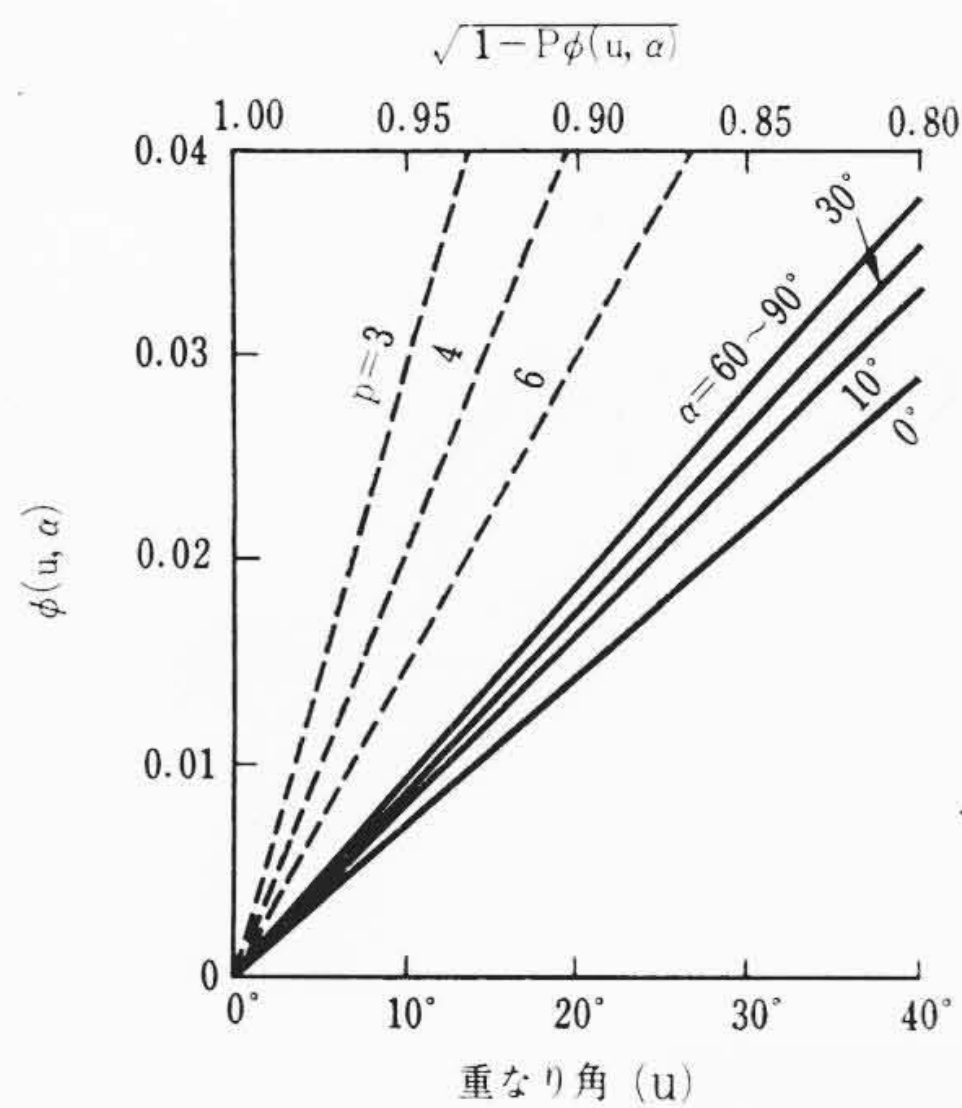


図4 サイリスタ電流の実効値係数

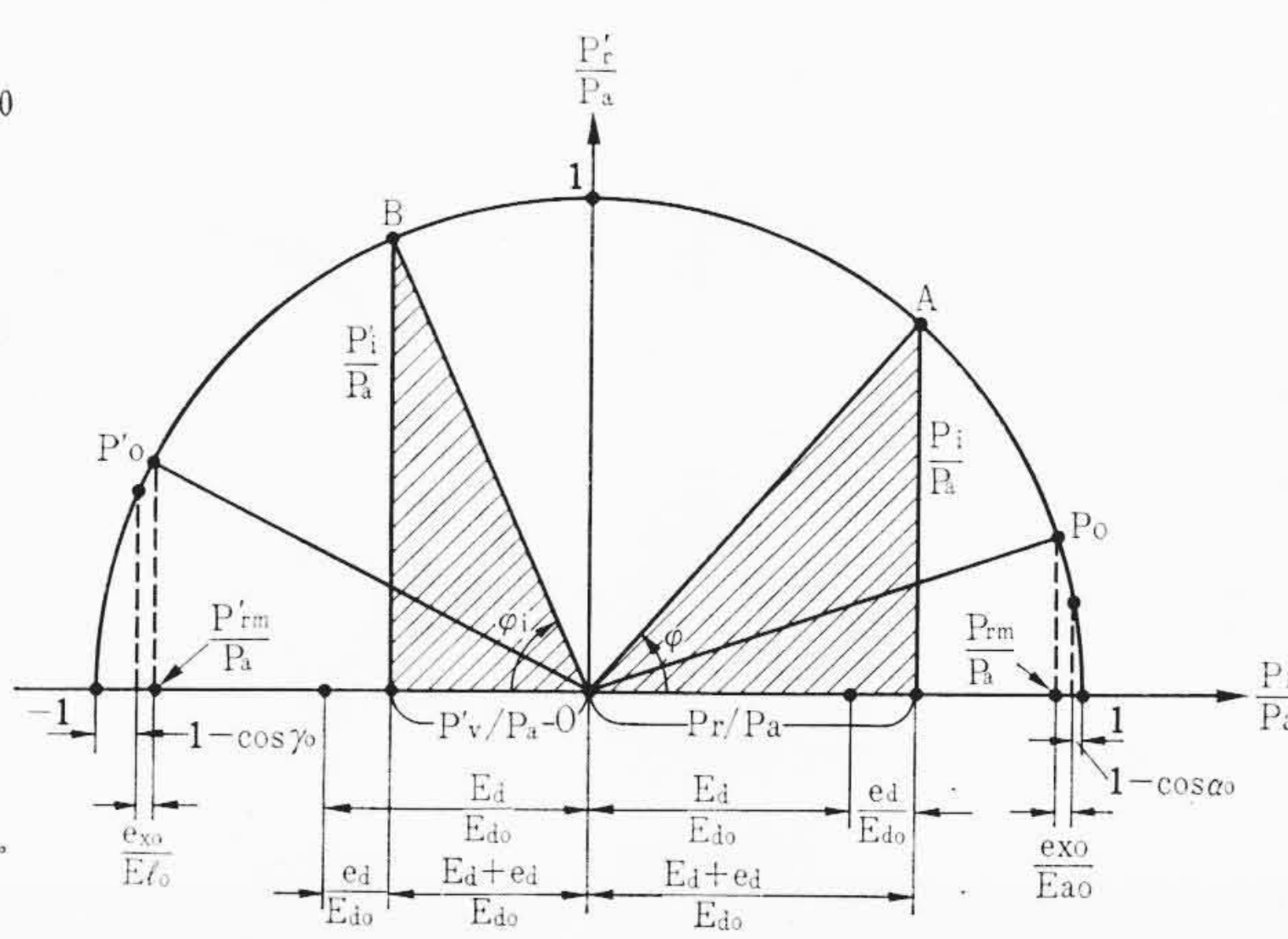


図5 3相全波制御回路の力率特性

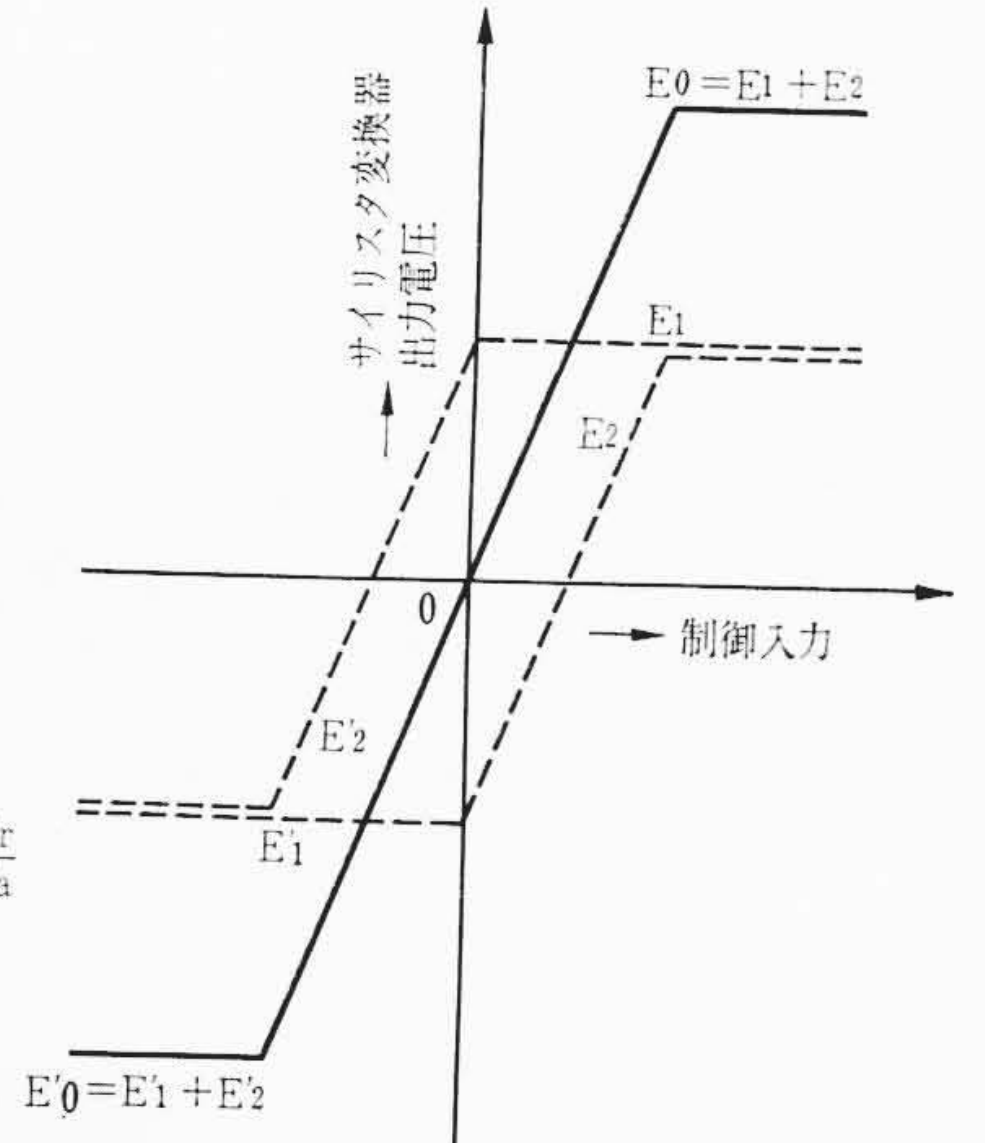


図6 2セット直列接続サイリスタ変換器の出力電圧特性

変換器 2 セット直列接続方式が有用である。そのおもな理由は、変圧器、リアクタ、整流器の費用増加がほとんどなく、そのうえ直流電圧の脈動を少なくできるなどの特長を有するからである。

3.1 1 セット・サイリスタ変換器の力率特性

3 相全波制御サイリスタ変換器の力率は次のようにして求められる。まず、負荷直流電圧 E_d は

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_2 \cos \frac{u}{2} \cos \left(\alpha + \frac{u}{2} \right) - e_r - 2e_f \quad (1)$$

ここに、 V_2 : 電源の相電圧

u : 転流の重なり角

α : 制御角(順変換時)

e_r : 抵抗降下

e_f : サイリスタ順方向降下

電源の線電流 I_2 は

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \sqrt{1 - 3\phi(u, \alpha)} \quad (2)$$

ここに、 I_d : 直流電流の平均値

$\phi(u, \alpha)$: u と α により定まる関数 (図 4 参照)

電源からみた皮相電力 P_a は

$$P_a = \sqrt{3} V_2 I_2 \quad (3)$$

ゆえに、力率 $\cos \phi$ は

$$\cos \phi = \frac{\text{有効電力}}{\text{皮相電力}} = \frac{(E_d + e_r + 2e_f) I_d}{P_a} \quad (4)$$

$$= \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\cos \frac{u}{2} \cos \left(\alpha + \frac{u}{2} \right)}{\sqrt{1 - 3\phi(u, \alpha)}} \quad (5)$$

以上は、3 相全波制御サイリスタ変換器の力率の解析を示しているが、力率特性をグラフ表示する場合には次のような取り扱い方が有用であろう。まず、順変換運転について考える。

負荷時直流電圧 E_d は、

$$E_d = (E_{d0} \cos \alpha - e_x) - (e_r + 2e_f) \quad (6)$$

$$\text{ここに、} E_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_2$$

$$e_x = \frac{3}{\pi} X I_d = \text{転流リアクタンス降下}$$

X : 転流リアクタンス

有効電力 P_r は、

$$P_r = (E_{d0} \cos \alpha - e_x) I_d \quad (7)$$

皮相電力 P_a は、

$$P_a = \frac{\pi}{3} \sqrt{1 - 3\phi(u, \alpha)} E_{d0} I_d \equiv \lambda E_{d0} I_d \quad (8)$$

$$\text{ここに、} \lambda = \frac{\pi}{3} \sqrt{1 - 3\phi(u, \alpha)}$$

ゆえに、リアクティブ電力 P_i は、

$$P_i = \sqrt{P_a^2 - P_r^2} \quad (9)$$

$$= \sqrt{P_a^2 - P_r^2} = \lambda E_{d0} I_d \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \alpha - \frac{e_x}{E_{d0}} \right)^2} \quad (10)$$

ここに、 P_x : 無効電力

P_h : ひずみ電力

インバータ運転の場合には、有効電力 P'_r 、リアクティブ電力 P'_i は次のようになる。

$$P'_r = (-E_{d0} \cos \gamma + e_x) I_d \quad (11)$$

$$P'_i = \lambda E_{d0} I_d \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \gamma - \frac{e_x}{E_{d0}} \right)^2} \quad (12)$$

以上の結果を、皮相電力 P_a で正規化し、グラフ表示すると図 5 のようになる。

同図に示されているように、順変換運転時には制御の余裕角 α_0 と転流リアクタンス降下 e_{x0} のために力率 P_{rm}/P_a に限界が存在し、またインバータ運転の場合には転流の余裕角 γ_0 と転流リアクタンス降下により力率 P'_{rm}/P_a に限界が存在する。すなわち、

$$\frac{P_{rm}}{P_a} = \frac{\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}}}{\frac{\pi}{3} \sqrt{1 - 3\phi(u, \alpha_0)}} \quad (13)$$

$$\frac{P'_{rm}}{P_a} = \frac{-\cos \gamma_0 + \frac{e_{x0}}{E_{d0}}}{\frac{\pi}{3} \sqrt{1 - 3\phi(u, \gamma_0)}} \quad (14)$$

3.2 対称な 2 セット直列接続サイリスタ変換器の力率特性

前節で求めた 1 セット・サイリスタ変換器の力率特性のグラフ表示は、2 セット直列接続サイリスタ変換器の場合に拡張できる。いま転流リアクタンス降下が同一であるとし、制御が対称の 2 セット直列接続サイリスタ変換器の力率特性について考える。

図 1 において、電圧 e_0, e_1, e_2 の平均値をそれぞれ E_0, E_1, E_2 とする。いま、図 6 に示すように、サイリスタ変換器 SCR₁ が順変換器として一定電圧 E_1 を出し、SCR₂ が順逆変換器として可変電圧 E_2 を出し、結局負荷には、

$$E_0 = E_1 + E_2 \quad (15)$$

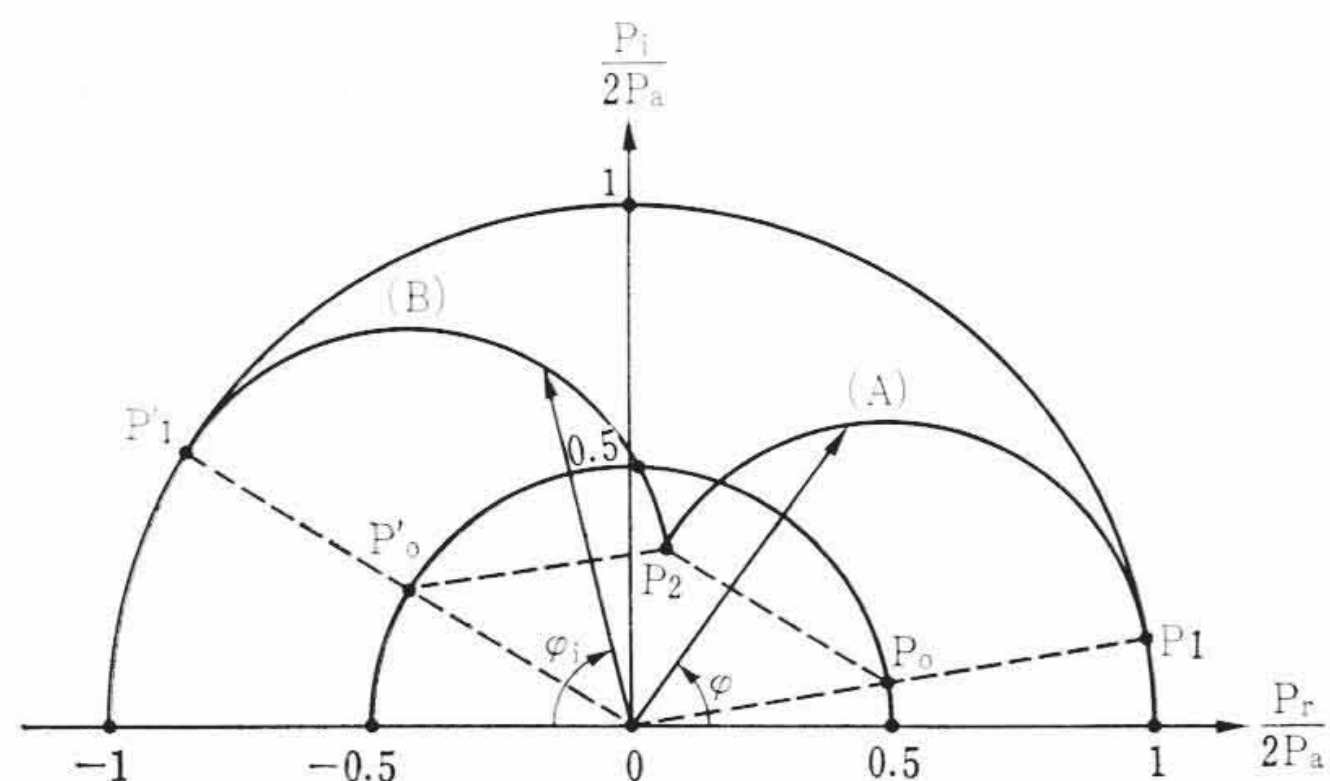


図7 対称な2セット直列接続サイリスタ変換器の力率特性

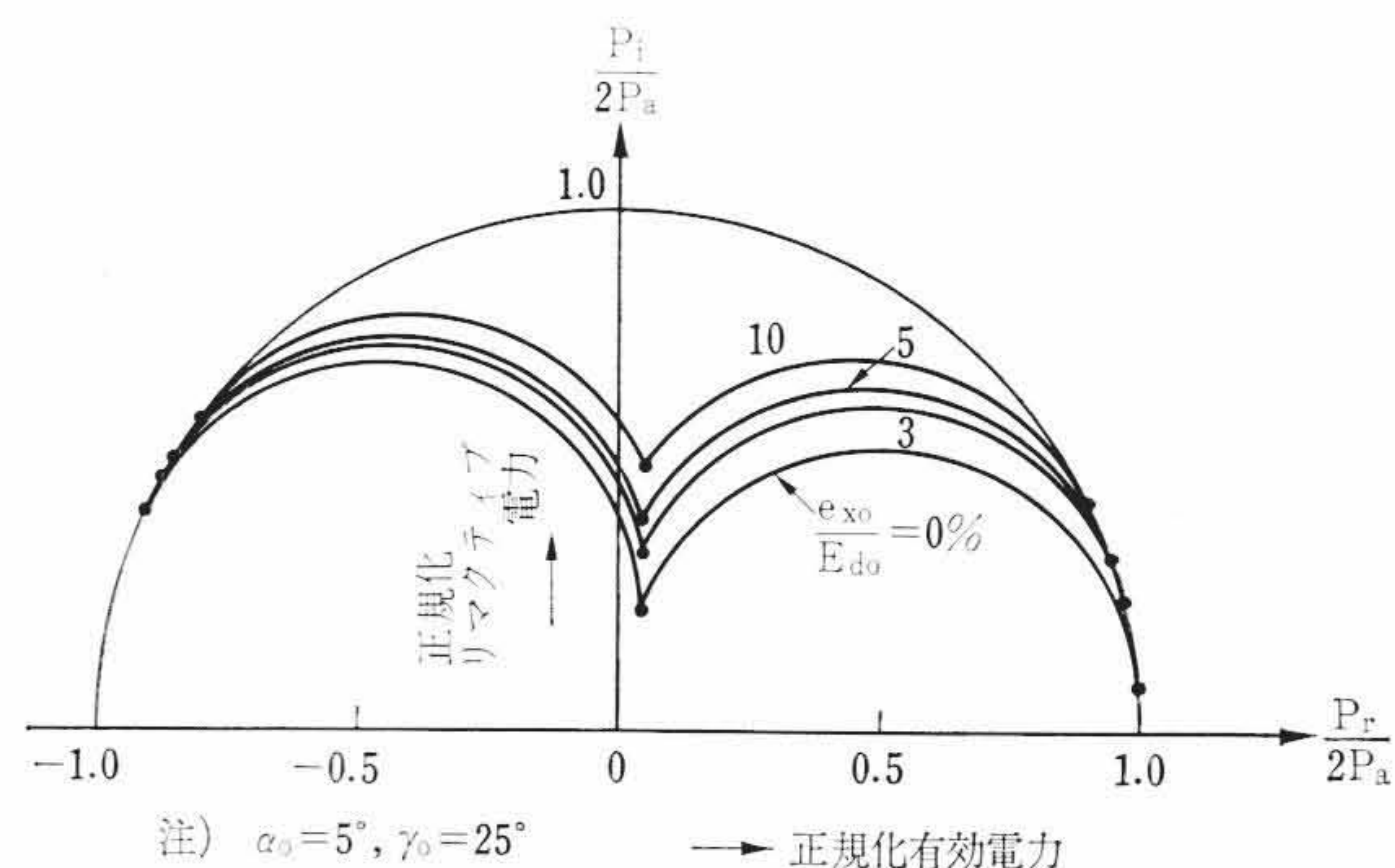


図8 力率特性の計算例

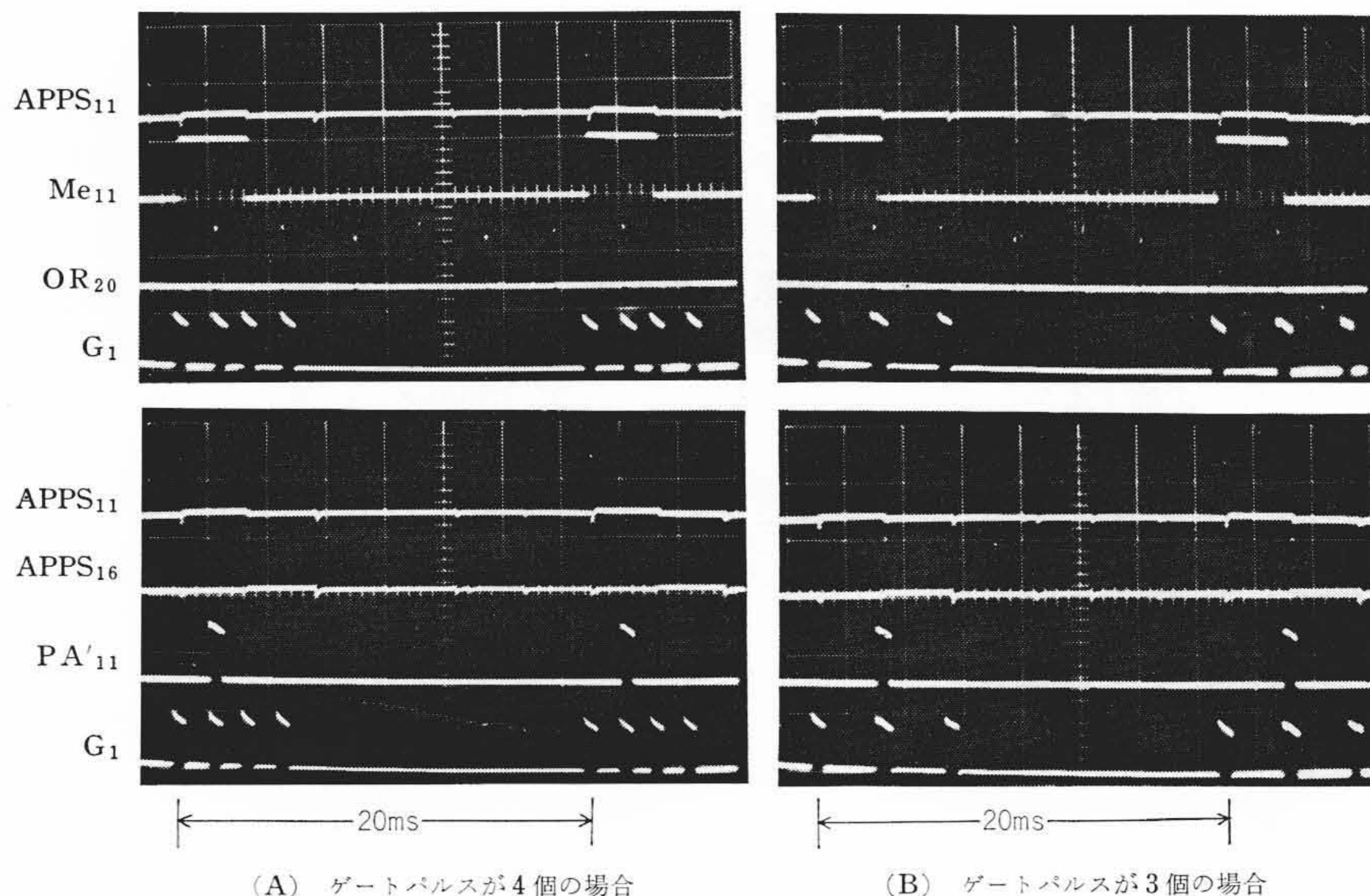


図9 ゲート・パルス分配回路実験結果

なる電圧を供給する場合を考える。この場合の力率特性は前節の説明から明らかなように、図7の右側の分枝(A)に示すようになる。

この分枝の特定の点 P_0, P_1 および P_2 の座標 $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ および (x_2, y_2) の値はそれぞれ次のようになる。ただし、2セット直列接続サイリスタ変換器の交流電源電圧は等しいとし、かつ

$$\frac{\pi}{3} \sqrt{1-3\phi(u, \alpha)} = \lambda \quad (\cong 1) \quad (16)$$

とする。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{2\lambda} \left(\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} y_0 = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{\lambda} \left(\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} y_1 = \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_2 = \frac{1}{2\lambda} (\cos \alpha_0 - \cos \gamma_0) \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} y_2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \alpha_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} + \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \gamma_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} \right] \end{cases} \quad (22)$$

次に、 SCR_1 が順逆変換器として可変電圧 E'_1 を、 SCR_2 が逆変換器として一定電圧 E'_2 を出す場合を考える。この場合、2セット直列接続サイリスタ変換器の力率特性をグラフ表示すると、図7の左

側の分枝(B)のようになる。点 P'_0, P'_1 の座標 $(x'_0, y'_0), (x'_1, y'_1)$ は次のようになる。

$$\begin{cases} x'_0 = -\frac{1}{2\lambda} \left(\cos \gamma_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} y'_0 = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \gamma_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} x'_1 = -\frac{1}{\lambda} \left(\cos \gamma_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} y'_1 = \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \left(\cos \gamma_0 - \frac{e_{x0}}{E_{d0}} \right)^2} \end{cases} \quad (26)$$

以上、図7の力率特性曲線 $\widehat{P_1 P_2 P'_1}$ は、(17)～(26)式から明らかなように転流リアクタンス降下 e_{x0} をパラメータとして幾つかの曲線で表わされる。

いま、例として $\alpha_0 = 5^\circ, \gamma_0 = 25^\circ, e_{x0}/E_{d0} = 0, 3, 5, 10\%$ として力率特性の計算結果をグラフ表示すると図8のようになる。

4. 実験結果

4.1 ゲート・パルス分配回路

ゲート・パルス分配回路は、動作原理どおりに確実に動作することが必要である。そこで、図3の回路において回路各部の波形をシンクロスコープにより測定した。ただし、自動パルス移相器 $APPS_{11}$ とサイリスタ変換器 SCR_1 の素子のゲート G_1 の波形を基準にして、他の波形を4現象シンクロスコープにより観測した。その結果の写真を図9に示す。図上 Me_{11} はリング・カウンタ出力、 OR_{20} はOR回路出力、 PA'_{11} はパルス増幅器出力を示す。

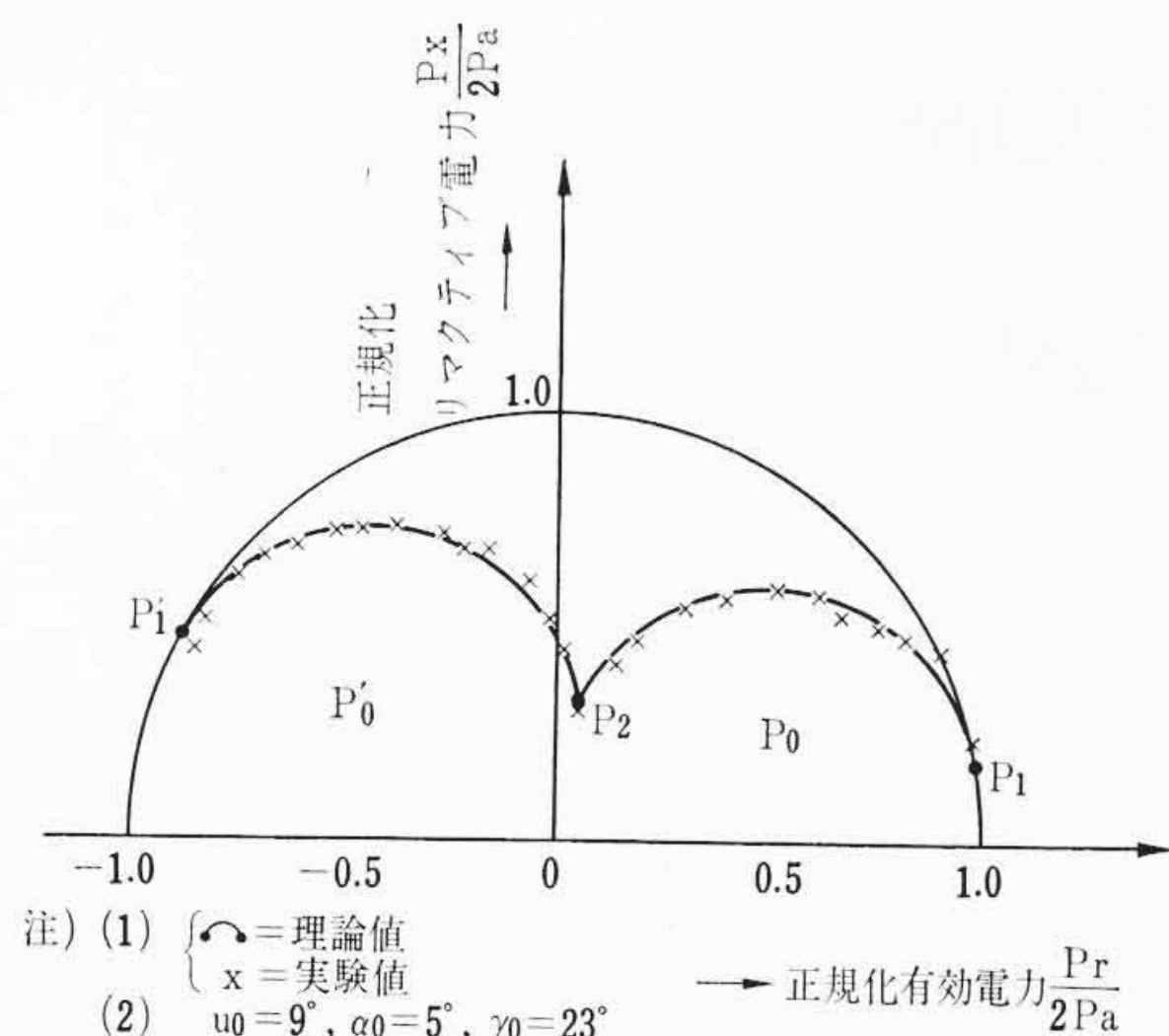


図 10 力率特性の論理値と計算値

SCR₁ 側の制御入力是一定であるが、SCR₂ 側の制御入力が可変であるためゲート・パルスは移相される。したがって、SCR₂ 側の制御入力の値の違いにより、同図(A)に示すように G₁ のゲート・パルスが 4 個の場合のほか、同図(B)のように 1 個が重なって、あたかも 3 個になる場合がある。また、同図に示されていないが 2 個が重なって、ちょうど 2 個になる場合がある。

以上の結果、ゲート・分配回路が正常に動作し、各サイリスタ素子のゲートに所望のゲート・パルスが与えられることがわかる。

4.2 無効電力減少制御

装置を試作し実験した。実験には 150 kW, 440 V 直流電動機を用いた。力率の測定は電源変圧器の一次側で行ない、変圧器の無負荷励磁損失を除外した。実測結果について、有効電力およびリアクティブ電力を正規化して示すと図 10 の×印のようになる。実験条件と同一条件における理論値を同図上に示す。この結果、理論値と実験値は比較的近似しているといえよう。

5. 結 言

いま製作中の圧延設備用電気品のうち、熟間仕上圧延機あるいは冷間圧延機駆動用電源は、2 台の直流電動機、あるいは 1 台の二重電動機子構造の直流電動機と、2 セットのサイリスタ変換器とを交互直列接続した大容量静止レオナード装置である。種々の技術的問題のうち、特に 2 セット直列接続サイリスタ変換器のゲート・パルス

分配および無効電力減少制御について検討した。

このような 2 セット直列接続静止レオナード装置では、次のような特長がある。

- (1) 負荷平衡が保たれる。
- (2) 電源位相を 30 度ずらせて 12 相効果がもたせられる。
- (3) 一方を順変換、他方を順逆変換運転することにより、無効電力減少制御ができる。
- (4) サイリスタ変換器および直流電動機単基当たりの分担電圧が全回路電圧の 1/2 ですむ。

以上から、この方式は大容量設備に適する。

次に、ゲート・パルス分配および無効電力減少制御の問題を検討して次の事項が明らかになった。

- (1) 2 セット直列接続サイリスタ変換器において、一方の変換器の各アームのサイリスタ素子群は、ゲート・パルスが印加されて後 60 度を責任角とし、その間に他方の変換器のゲート・パルスを分配しなければならない。したがって、各アームのサイリスタ素子群は電源の一周に最大合計 4 個のゲート・パルスが印加される。
- (2) ゲート・パルスの分配はリング・カウンタにより確実にこなうことができる。
- (3) 2 セット直列接続サイリスタ変換器のうち、一方を順変換運転(+E)、他方を順逆変換運転(±E)することにより、全回路出力に 2E~0 の電圧が得られる。このようにゲート制御することにより無効電力が約半減する。
- (4) 最大あるいは最小電圧のときの無効電力を減少させるには制御の進み角 α₀ および転流余裕角 γ₀ をできるだけ小さく選び、また転流リアクタンス降下 e_x を小さくするとよい。
- (5) 力率特性の理論値と実験値は比較的一致した。

以上、本研究の遂行に当たり日立製作所日立工場の関係各位から種々のご指導とご援助を得た。特に、日立製作所日立工場宅間、斎藤の両氏および日立研究所の久保田氏のご援助は大きい。ここに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 前川、小野田：日立評論 38, 1131 (昭 31-9)
- (2) 小西：日立評論 48, 681 (昭 41-6)
- (3) R. Cushman: Electronics 38, 110 (1965-10)

Vol. 49

日 立 評 論

No. 5

目 次

■題 目

- ・サイリスタを用いた誘導電動機速度制御方式
- ・油浸絶縁紙のコロナ劣化
- ・最近のディーゼル発電機
- ・蒸気タービン・テボジットの飽和蒸気による除去
- ・高速軌道試験車マヤ 34
- ・最近の水道用ならびにかんがい用ポンプ設備のウォータハンマ対策
- ・NU-8A 形搬送電信装置
- ・書 状 区 分 機
- ・ユーロピウム付活希土類けい光体の発行と励起スペクトル

- ・275 kV OF ケーブル用接続箱の諸特性

■電子顕微鏡特集

- ・日立 1,000 kW 電子顕微鏡の構造および性能
- ・普及形超高圧電子顕微鏡 HU-200 の開発
- ・HU-11D 形日立電子顕微鏡の諸特性
- ・超高圧電子顕微鏡の金属学への応用
- ・電子顕微鏡的観察に基づく glucoeo — 6 — phosphatase の活性局生部位に関する研究
- ・電子顕微鏡の位相差コントラストと分解能

発行所 日 立 評 論 社

東京都千代田区丸の内 1 丁目 4 番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地
振替口座 東京 20018 番

取次店 株式会社 オーム社書店