

素波里発電所向け
極数変換形水車発電機

Pole- Changing Type Hydraulic Turbine Generator

鈴木 登*
Noboru Suzuki

要 旨

秋田県素波里発電所納め、極数変換形水車発電機は日立製作所で初めて納入した新機種である。
本機は発電専用機であるがシーズンにより落差が大幅に変わるので、それぞれの落差でキャビテーションとそれに伴う振動特性の改善および効率の向上を図るため2速度機すなわち極数変換機としたものである。極数変換方式にはいろいろあるが、本機では熱的、機械的にバランスがとれ、長年の運転に対し最も信頼性のある「同一形状磁極のみを使用した減極方式」を採用している。本機の完成により計算値と実測値がほぼ一致することを確認し、今後さらに大容量機への適用を可能にした。

1. 緒 言

極数変換方式は古くから知られていることであるが、実際に設計する場合には固定子および回転子の変換方式、磁束利用率、鉄損、漂遊負荷損、諸種インピーダンス、電機子反作用、飽和曲線、振動、波形ひずみなどの理論的解明が必要である。
極数変換方式は、わが国では揚水発電の発達に並行して脚光を浴び検討されてきた。揚水発電所または落差変動の大きい一般の発電所では、ポンプ水車または一般水車の最高効率も落差に応じて回転速度の異なった点にある。したがって、落差に応じてそれぞれの最大効率を示す付近の回転速度で運転する方式とすることが総合的にみて経済的な場合があり、この点から極数変換して2種の回転速度を生み出す極数変換機が検討されてきた。
日立製作所では昭和28年以来数例の実験機を作り理論解明および実測との比較を行ってきたので本機に十分応用することができた。
素波里発電所の場合は発電専用機であるが、シーズンにより落差が大幅に変わるのでそれぞれの落差でキャビテーションと、それに伴う振動特性の改善および効率の向上を計るため極数変換機を採用したわけである。

2. 仕 様

本機の仕様は次のとおりである。

	極数変換前	極数変換後
容 量(kVA)	7,100	7,100
回転速度(rpm)	429	500
電 圧(V)	6,600	6,600
周 波 数	50	50
極 数(Hz)	14	12
力 率	0.9	0.9

なお、励磁容量は、75kW、220Vである。

3. 構 造

本機は普通形機であり図1は構造断面図を示している。次に構造の概要を述べる。

3.1 固 定 子

固定子は、2分割で外周に4個の空気冷却器を取り付けている。

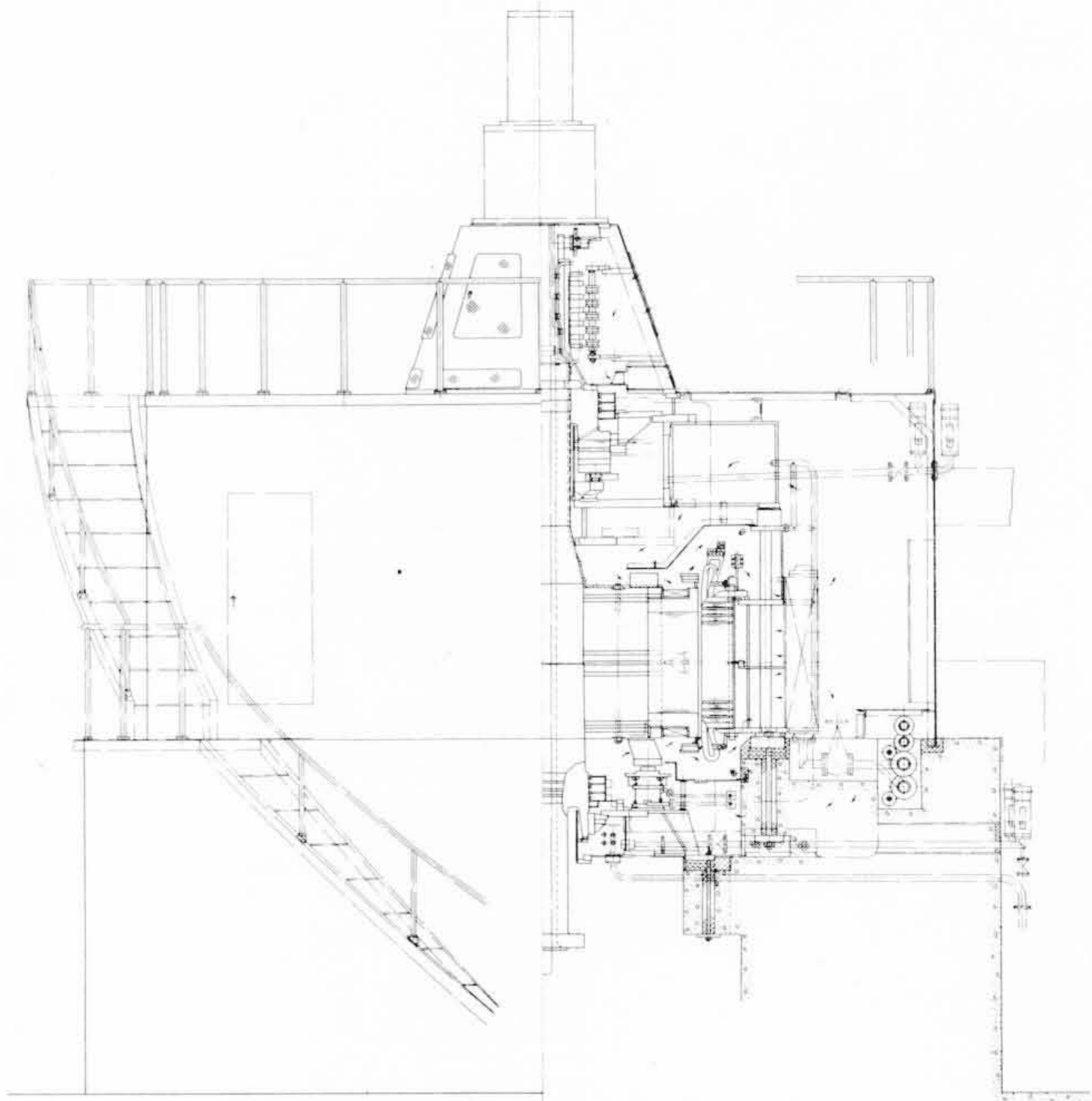


図1 構造断面図

固定子コイルは、2ターンでエポキシレジンを注入して製作されている。

3.2 回 転 子

本機は高速機で、しかもカプラン水車直結のため無拘束速度が265%と高いため、ダンパ接続片を鍛鋼製リングに取り付けて機械的強度に耐える設計としてある。

ロータリムは、厚鋼板を積層して作られ、これを直接シャフトに焼ばめしている。

ロータ外径が約2.2mと小さいため、ブレーキリングはファンと兼用構造になっている。また、従来、一般の機械ではスラストベアリングランナを備えているが、本機ではこれを省略し、スラストカラーがその性能を兼備する構造である。

3.3 ベア リ ン グ

スラストベアリングには、日立式ピボットスプリングを使用し、オイルクーラ2個を油槽(ゆそう)外に設置し、スラストカラー部で発生するセルフポンプアクションを利用して油を循環させている。

ガイドベアリングには、日立製作所独得の円筒形セグメントベアリングを採用している。

3.4 そ の 他

励磁方式としては静止サイリスタを採用した。発電機頂部には

* 日立製作所日立工場

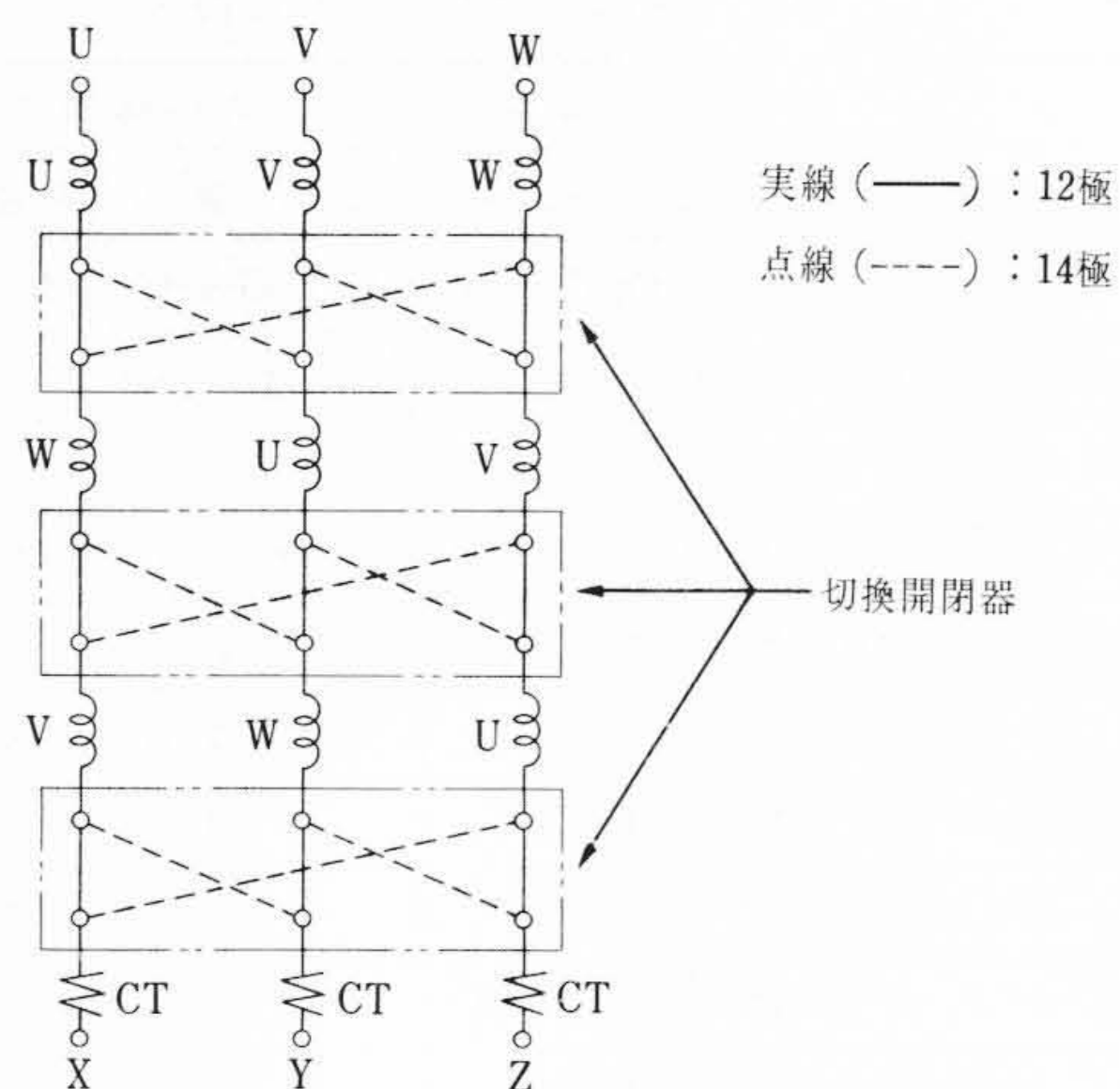


図3 固定子極数変換方式

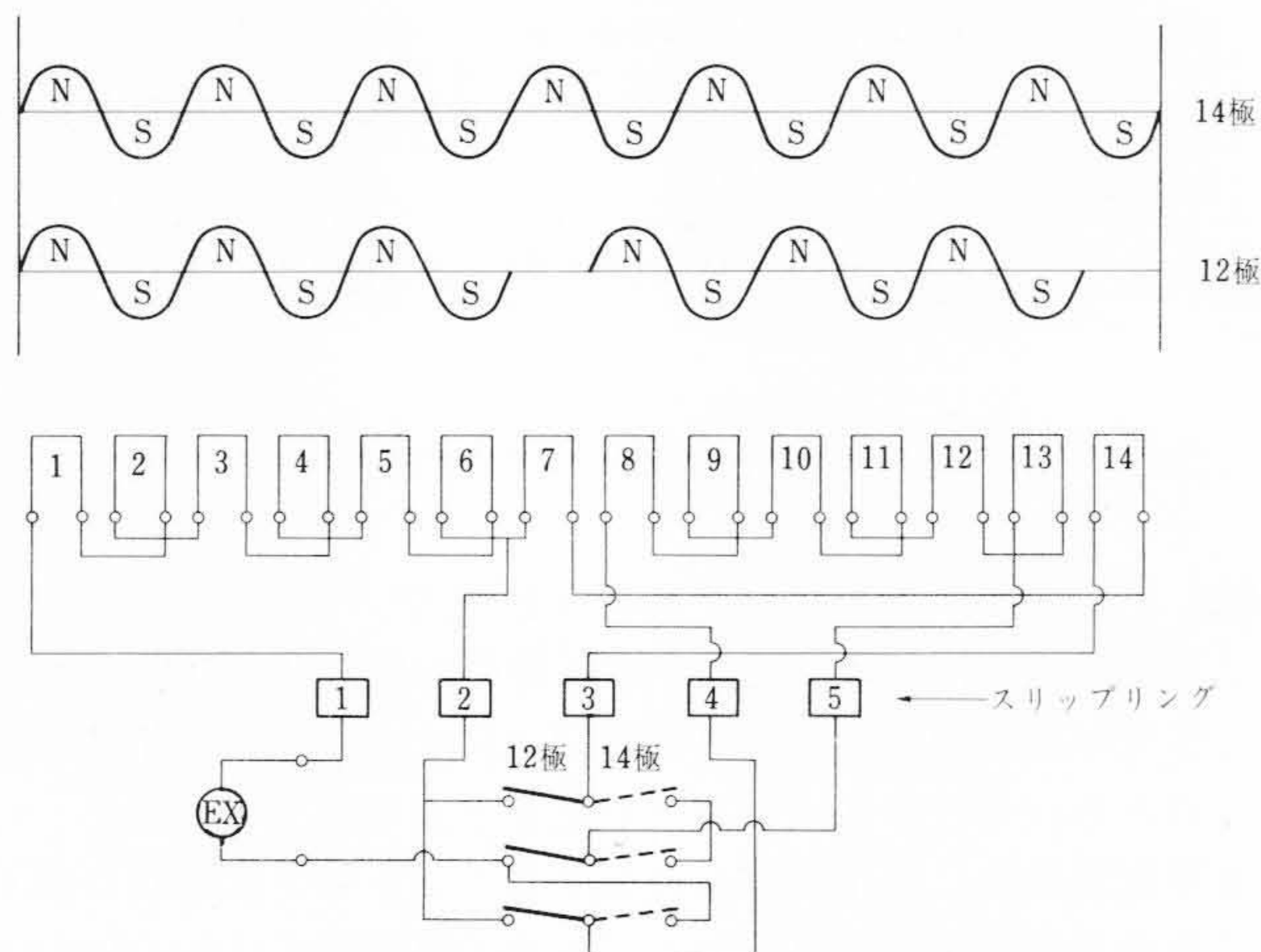


図4 回転子極数変換方式

極した2極は異状電圧発生を防止するため短絡してある。

6.3 固定子巻線および回転子巻線の極数切換方式の組合せ

極数変換前の状態を正規状態と名づけることにする。磁束利用率は極数変換すると約67%になるので、このとき固定子側は正規の状態にしておく。このようにすることにより極数変換前後で機械全体の電圧発生率の差が最小となり、経済的な機械を設計することができる。このことを具体的に知るために表2にその比較を示した。なお、固定子巻線の利用率は正規状態では、通常の巻線係数であり0.95、変換後は千鳥結線となるので0.83、そして磁束利用率は正規状態で1.0、変換後0.67である。

表2からわかるように、最適組合せでは、14極と12極のときの電圧発生率は（100：89）であるが、不適格組合せでは（114：78）となり、最適組合せに比べて、約14%マシンサイズが大きくなる。したがって、前述のように、回転子を正規運転とするときは、固定子を極数変換しておき、回転子が極数変換したときは、固定子

表2 極数切換方式の組合せ例

項目	組合せ 極数		組合せ 極数	
	(A) 最適組合せ 14極	12極	(B) 不適格組合せ 14極	12極
固定子巻線利用率	0.83 (変換後)	0.95 (正規)	0.95 (正規)	0.83 (変換後)
回転子巻線利用率	1.0 (正規)	0.67 (変換後)	1.0 (正規)	0.67 (変換後)
電圧発生率	0.83×1.0 =0.83(100%)	$0.95 \times 0.67 \times \frac{14}{12}^*$ =0.74(89%)	0.95×1.0 =0.95(114%)	$0.83 \times 0.67 \times \frac{14}{12}^*$ =0.65(78%)

注：*12極時は、14極に比べて回転速度が $(\frac{12}{14})$ 倍になるため、発生電圧も $(\frac{12}{14})$ 倍になる。

結線を正規結線とするのが最も良い組合せと考えられる。

7. 極数変換時に異状高調波電圧を 固定子コイルに誘起させぬ条件

極数変換機において、回転子が極数変換されたとき、磁束波の中に整数倍調波と分数倍調波が含まれる。いま磁束波の中に含まれる各高調波につき、一般の発電機の場合と極数変換機の場合とを比較すると表3のようになる。

したがって、極数変換した発電機の固定子コイルに発生する電圧および電流波形を一般の発電機と同程度にするためには、偶数整数倍調波と、分数倍調波成分の電圧を固定子コイルに誘起させないことが必要である。そのためには短節巻係数または分布巻係数を所要調波 (p_2) を除き、あらゆる偶数整数倍調波と分数倍調波に対しゼロとなるように設計しなければならない。このような

表3 磁束波の中に含まれる高調波の種類

項目	一般の発電機 (極数変換しないもの)	極数変換した発電機
奇数整数倍調波	含有	含有
偶数整数倍調波	含有せず	含有する場合もある (毎極毎相のスロット数と極数変換比の 関係で含有する場合と、しない場合がある。)
分数倍調波	含有せず	含有

条件を吟味した結果を次に述べる。

7.1 短節巻係数

今、短節巻係数を一般式で表わせば、

$$P_1 = \lambda p_1 \dots\dots\dots(1)$$

$$P_2 = \lambda p_2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\gamma = P_2 / P_1 = \lambda p_2 / \lambda p_1 = p_2 / p_1 \dots\dots\dots(3)$$

$$K_{SN} = \sin \left(\frac{\pi}{6} \cdot \frac{W}{q} \cdot \frac{n}{p_2} \right)^{(1)} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

K_{SN} ：短節巻係数

W ：1コイルピッチのまたがりスロット数

n ：調波次数

q ：毎極毎相のスロット数

P_1 ：正規運転時における全磁極数

P_2 ：極数変換時における全磁極数

λ_1 ： P_1 と P_2 の最大公約数

p_1 ：界磁極グループの最小単位を示す磁極数
(P_1 に対応)

p_2 ：界磁極グループの最小単位を示す磁極数
(P_2 に対応)

γ ：極数変換比

(4)式から、わかるように短節巻係数は特定の第 n 次調波の場合に対してのみゼロとなるだけである。

7.2 分布巻係数

前記したように短節巻係数は特定の第 n 次調波の場合しかゼロとならないため、分布巻係数が所要調波 p_2 を除いたあらゆる偶数整数倍調波および分数倍調波に対してゼロとなる条件があれば、通常の発電機とほぼ同じ電圧波形を保つことができる。

これを満足する条件⁽¹⁾を求めると、表4および表5となる。

ここに、

N_s ：電機子全スロット数

表4 極数変換後すべての分数調波に対して分布巻係数がゼロとなる条件 (β = 奇数の場合)

定数	(1) 極数変換比: $\gamma = P_2/p_1 = \lambda p_2/\lambda p_1 = p_2/p_1$ (2) 毎極毎相のスロット数: $q = \frac{N_s}{3P_2} = \frac{N}{\beta}$ (3) Slot Star 番号差: $C = \frac{6Nk+1}{\beta}$ (k は最小値を選ぶ) $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ (4) スロットピッチ電気角: $\alpha n = 60^\circ \frac{n}{qp_2}$ $\begin{cases} p_2 = \text{偶数のとき} & n = 2, 4, 6, \dots (\text{偶数}) \\ p_2 = \text{奇数のとき} & n = 1, 3, 5, \dots (\text{奇数}) \end{cases}$ (5) Repeatable Group 数: $b = \frac{N_c}{2NQ} = \frac{P_2}{2\beta Q}$	
	$p_2 = \text{奇数}$	$p_2 = \text{偶数}$
すべての分数調波に対して分布巻係数がゼロとなる条件	(1) $\beta \cdot C$ と p_2 が互いに素 (2) $b = t \cdot p_2$ $(t = 1, 2, 3, \dots \text{正の整数})$	(1) $\beta \cdot C$ と $\frac{p_2}{2}$ が互いに素 (2) $b = t \cdot \frac{p_2}{2}$ $(t = 1, 2, 3, \dots \text{正の整数})$
残存調波	(1) 所要調波 p_2 (基本波) (2) 奇数整数倍調波	(1) 所要調波 p_2 (基本波) (2) 奇数整数倍調波
分布巻係数	$K_{dn} = \frac{1}{2Nb} \cdot \frac{\sin(\alpha n \cdot 3NCb)}{\cos(\frac{\alpha n \cdot 3NC}{2})} \cdot \frac{\sin(\frac{\alpha n \cdot NC}{2})}{\sin(\frac{\alpha n \cdot C}{2})}$	

N_c : 電機子コイル一相あたりの直列導体数
 Q : 並列回路数, 但し 2 列 Y のときは $\frac{1}{2}$, 3 列 Y のときは $\frac{1}{3}$, 4 列 Y のときは $\frac{1}{4}$ のような, 分割結線を行なう場合とする。

N : 毎極毎相のスロット数を分数で表わしたときの分子の値

β : 毎極毎相のスロット数を分数で表わしたときの分母の値

β が奇数でかつ p_2 が奇数または偶数の場合, および β が偶数で p_2 が奇数の場合は, 極数変換後空隙(くうげき)磁束波の中に含まれる高調波の種類は, 変換後基本波となるべき所要調波 p_2 およびこれに対する奇数倍調波(整数倍および分数倍)が存在し, 偶数倍調波は理論的に含まれない。そして所要調波以外の分数調波に対して分布巻係数をゼロにすることができる条件が存在する。したがって, この条件を満足する設計をすれば, 固定子コイルに発生する電圧の中に含まれる高調波の種類は一般の発電機と同一条件となる。

本機の場合, 毎極毎相のスロット数(q)は 4 であり ($N = 4$, $\beta = 1$) また $P_1/P_2 = \lambda p_1/\lambda p_2 = 2 \times 7/2 \times 6$ なるため, $\beta = \text{奇数}(=1)$, $p_2 = \text{偶数}(=6)$ の組合せとなり, 同上の条件を満足する設計となっている。

もし β および p_2 がともに偶数の場合は, 極数変換後空隙磁束波の中に含まれる高調波の種類は, 変換後基本波となるべき所要調波 p_2 およびこれに対する奇数倍調波(整数倍および分数倍)のほかに偶数倍調波(整数倍および分数倍)が含まれる。この偶数倍調波に対しては, 分布巻係数が理論的にゼロとならない。したがって, この組合せは避けるべきである。どうしてもこのような組合せになる場合は, 各偶数倍調波に対する分布巻係数を求め, 電圧波形ひずみを検討したうえで採否を決めるべきである。

表5 極数変換後すべての分数調波に対して分布巻係数がゼロとなる条件 (β = 偶数の場合)

定数	(1) 極数変換比: $\gamma = P_2/P_1 = \lambda p_2/\lambda p_1 = p_2/p_1$ (2) 毎極毎相のスロット数: $q = \frac{N_s}{3P_2} = \frac{N}{\beta}$ $\beta = 2\beta'$ (3) Slot Star 番号差: $C' = 2 \left(\frac{3Nl+1}{\beta} \right) = 2C''$ $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ (l は最小値を選ぶ) (4) スロットピッチ電気角: $\alpha n = 60^\circ \frac{n}{qp_2}$ $\begin{cases} p_2 = \text{偶数のとき} & n = 2, 4, 6, \dots (\text{偶数}) \\ p_2 = \text{奇数のとき} & n = 1, 3, 5, \dots (\text{奇数}) \end{cases}$ (5) Repeatable Group 数: $b = \frac{N_c}{NQ} = \frac{P_2}{\beta Q}$	
	$p_2 = \text{奇数}$	$p_2 = \text{偶数}$
すべての分数調波に対して分布巻係数がゼロとなる条件	(1) $\beta' C''$ と p_2 が互いに素 (2) $b = t \cdot p_2$ $(t = 1, 2, 3, \dots \text{正の整数})$	(1) $\beta' C''$ と $\frac{p_2}{2}$ が互いに素 (2) $b = t \cdot \frac{p_2}{2}$ $(t = 1, 2, 3, \dots \text{正の整数})$
残存調波	(1) 所要調波 p_2 (基本波) (2) 奇数整数倍調波	(1) 所要調波 p_2 (基本波) (2) 奇数整数倍調波 (3) 偶数整数倍調波
分布巻係数	$K_{dn} = \frac{1}{Nb} \cdot \frac{\sin(\frac{\alpha n \cdot 3NC'b}{2})}{\sin(\frac{\alpha n \cdot 3NC'}{2})} \cdot \frac{1}{\sin(\frac{\alpha n \cdot c'}{2})} \left[\sin^2\left(\frac{\alpha n \cdot c'}{2}\right) \cdot \frac{N+1}{2} + \sin^2\left(\frac{\alpha n \cdot c'}{2} \cdot \frac{N-1}{2}\right) - 2 \sin\left(\frac{\alpha n \cdot c'}{2} \cdot \frac{N+1}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha n \cdot c'}{2} \cdot \frac{N-1}{2}\right) \times \cos\left(\frac{\alpha n \cdot 3NC'}{2}\right) \right] \frac{1}{2}$	

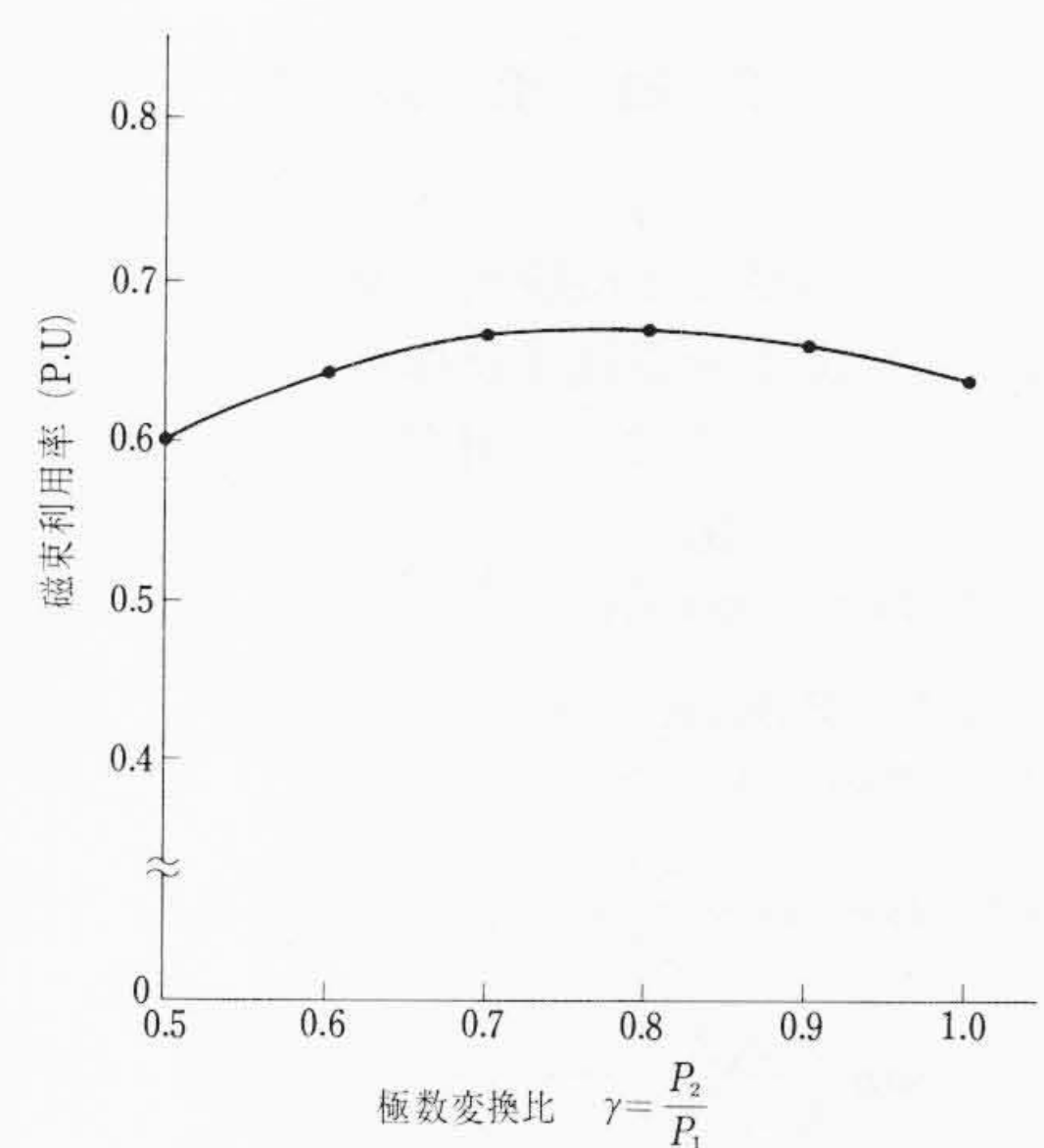


図5 磁束利用率

8. 磁束利用率

本機で採用した C 方式の場合, 磁束利用率は次式で示される。

$$\eta_{p_2} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{p_1}{p_1^2 - p_2^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p_2}{2 \cdot p_1}\right) \dots \dots \dots (5)$$

今, $\gamma = p_2/p_1$ であることおよび極数変換可能な組合せは,

$p_1 = p_2 + 1$ であるを要することから、(5)式は次のように変形される。

$$\eta p_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + \gamma} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \gamma \right) \cdots \cdots (6)$$

本機の場合、 $p_1 = 7$ 、 $p_2 = 6$ 、 $\gamma = 6/7$ であるゆえ、 $\eta p_2 = 0.67$ となる。一般に極数変換可能な変換比は $\gamma = 0.5 \sim 1.0$ であるため、この範囲における磁束利用率を求めると、図5のようになる。すなわち、C方式の場合、磁束利用率は、0.6～0.67程度である。

9. リアクタンス

回転子の極数変換前（本機では14極）は、一般の発電機と同様の計算でよい。しかし極数変換後（本機では12極）は、14極をベースに考えると、12極では6/7の分数調波磁束を基本波としている。そのため実際に存在する14極の磁極ピッチと6/7の分数調波磁束ピッチとが一致していないため各種パーミアンスが一般の場合とは異なり、極数変換機特有の計算をしなければならない。

また極数変換後は回転子が凸極構造であるにもかかわらず、凸極性の効果がなくなる傾向にあることも特記すべき点である。リアクタンスの計算式を紹介するには多くの紙面を必要とするため本誌では割愛し後の機会に譲ることとする。

10. 鉄 損

回転子の極数変換前、すなわち14極では一般の発電機と同様の計算でよい、しかし、回転子の極数変換後、すなわち12極では磁束波形の中に奇数倍調波および分数倍調波が含まれるので、これらの調波により固定子鉄心内に損失が発生する。したがって、12極では基本波に基づく鉄損のほかに、これら調波に基づく鉄損分も考慮しなければならない。

11. 漂 遊 負 荷 損

回転子を極数変換したとき、三相短絡時の磁束波形は界磁極の起磁力軸と電機子反作用起磁力の軸が各極ごとで異なるため、打ち消されずに残る磁束が多くなり損失が増大する、また、固定子コイルの配置と接続方法に原因する損失などが一般の発電機とは違った損失となるので注意を要する。

12. 磁 束 波 形

極数変換したとき、負荷時空隙磁束波がどのようになるかを正確に推定することが極数変換機解析の基本の一つである。その求め方は、無負荷磁束波より電機子反作用磁束波（縦軸および横軸分）を差し引けばよい。磁束波形の計算式は次のように表わされる。

$$b_{no} = \frac{\pi E_2 \times 10^8}{4.44 N_{CP} f \eta_2 \tau_2 L_C} \sin \theta \cdots \cdots (7)$$

$$B_m = \frac{1.2 \sqrt{2} N_{CP} K \omega_2 I_2}{\delta_{\min} \cdot K_{C2} P_2} \cdots \cdots (8)$$

$$bd(r) = B_m \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_2} \left(X_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_1} [X - (r-1) \tau_1] \sin \left(\frac{\pi X}{\tau_2} \right) \cdots \cdots (9)$$

$$bq(r) = B_m \cdot \cos \left(\frac{\pi X_1}{\tau_2} \right) \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_1} [X - (r-1) \tau_1] \cdot \cos \left(\frac{\pi X}{\tau_2} \right) \cdots \cdots (10)$$

ここに、

b_{no} : 無負荷磁束波

$bd(r)$: 縦軸電機子反作用磁束波

$bq(r)$: 横軸電機子反作用磁束波

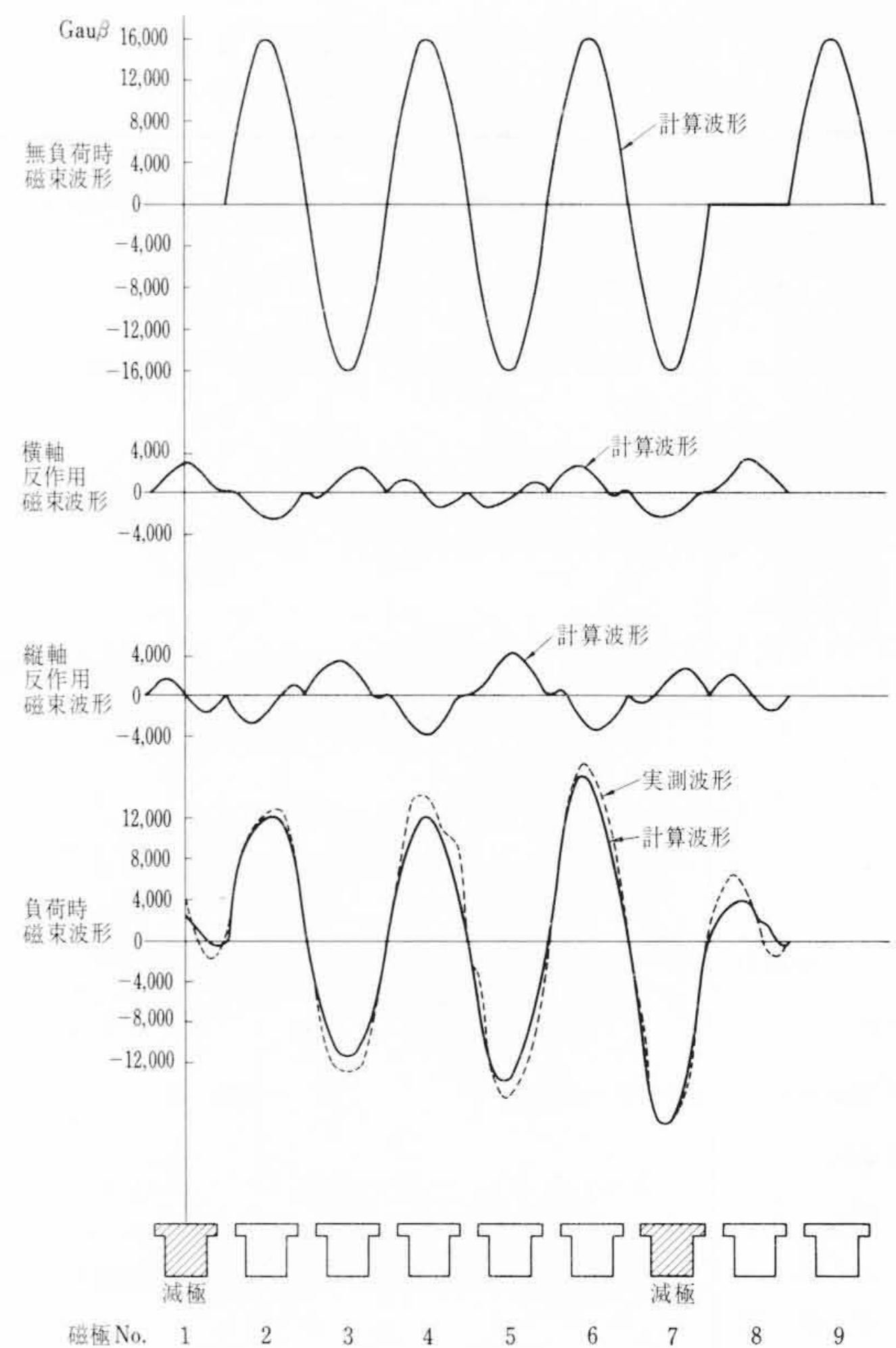


図6 磁 束 波 形

E_2 : 内部誘起電圧

N_{CP} : 電機子一相直列導体数

$K \omega_2$: 巻線係数

I_2 : 電機子電流

$\delta_{\min}$: 空隙最小ギャップ

K_C : カーター係数

τ : 磁極ピッチ

r : 磁極番号（減極部を1番とする）

X : 位相角（ $r=1$ の磁極中心を0度とする）

η : 磁束利用率

添字1 : 極数変換前の意

添字2 : 極数変換後の意

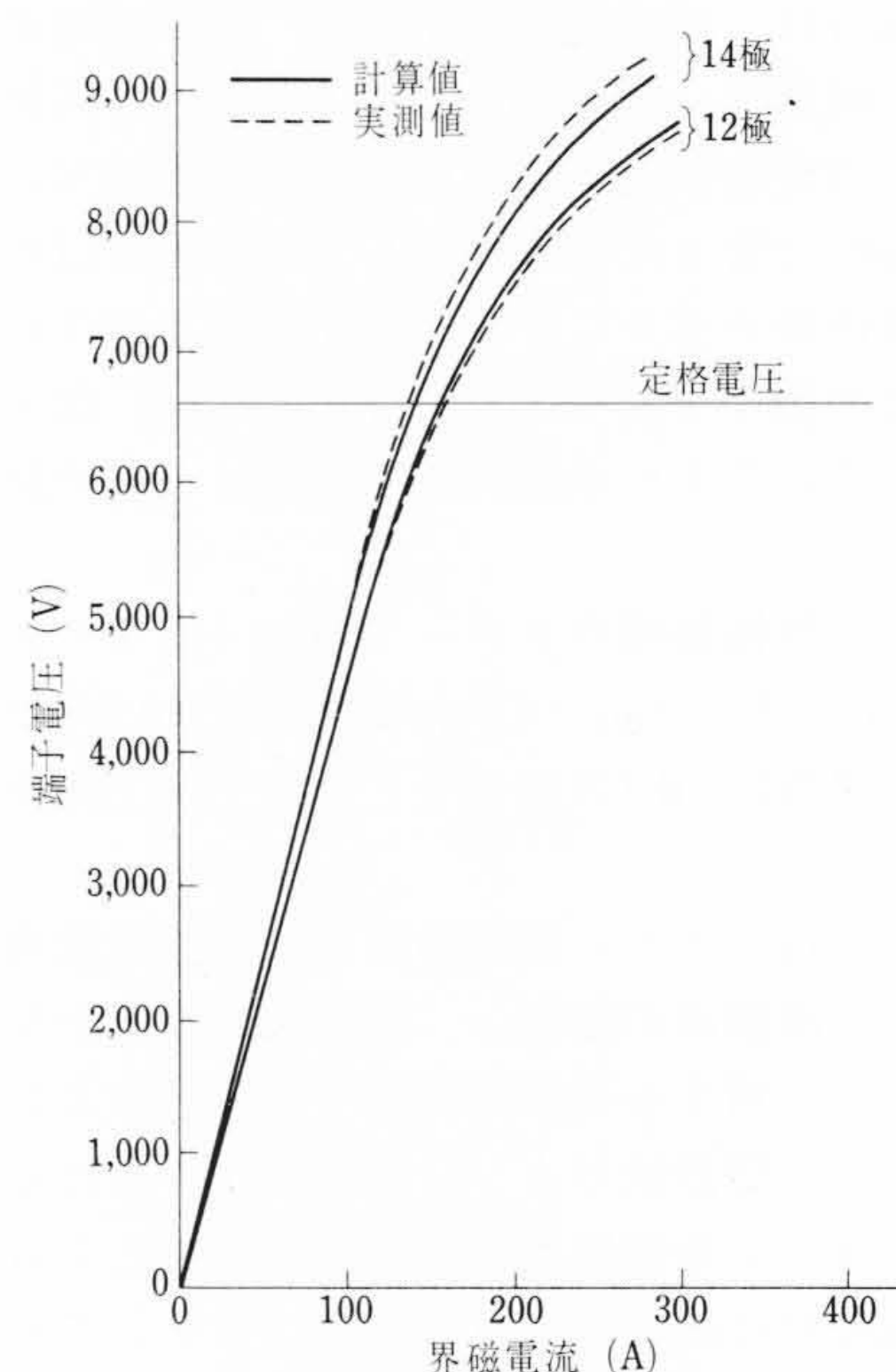


図7 無 負 荷 飽 和 曲 線

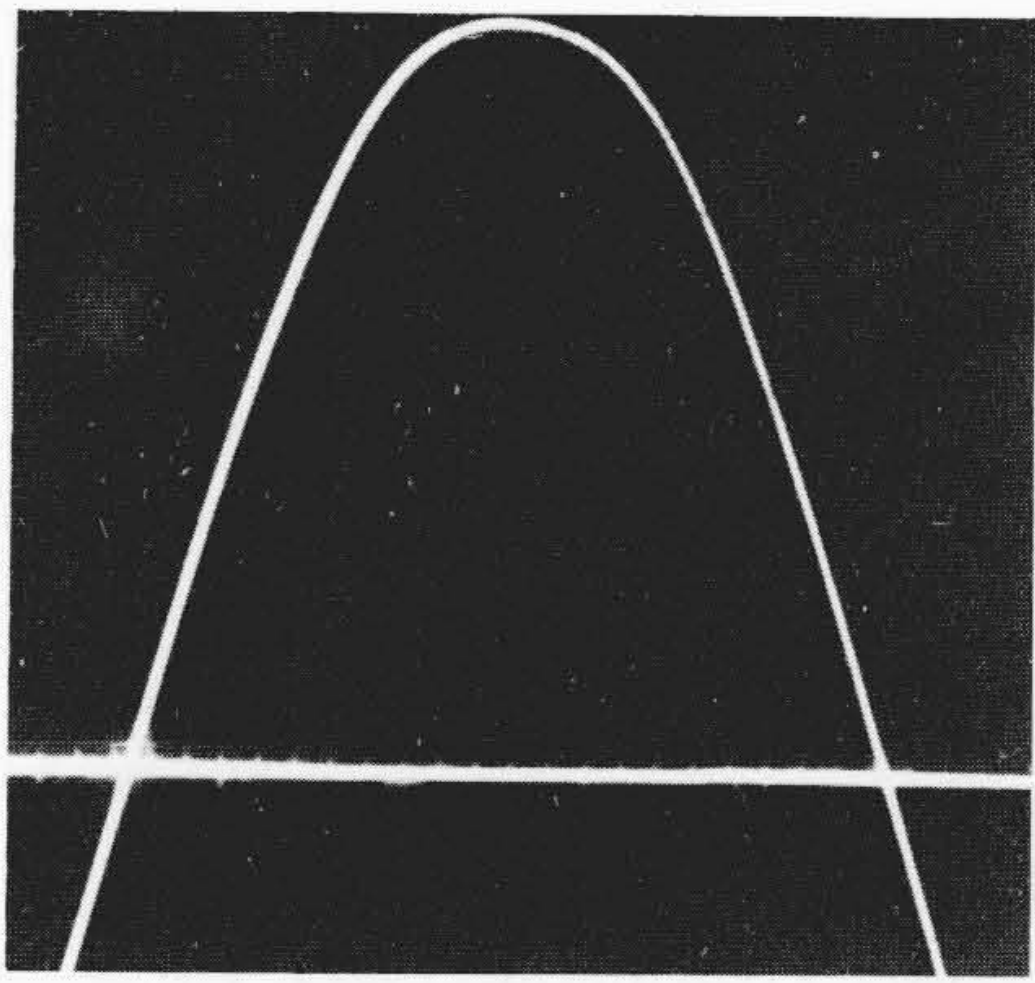


図8 極数変換前の電圧波形(14極)

現地試験時、5,000kW、6.6kV、490A、2,500kVARにて負荷時空隙磁束波形を測定したので、これの計算結果と実測値の比較を示すと図6になる。計算と実測は非常に良く一致している。

13. そ の 他

図7は無負荷飽和曲線であるが、実測値と計算値がほぼ一致している。また、電圧波形歪み率は極数変換前が約3%、極数変換後が約1.2%であり一般の発電機の場合と同程度である。なお、極数変換前の電圧波形は図8に、極数変換後それは図9に示すとおりである。

14. 結 言

極数変換機は日立製作所として初めての納入品であるが、昭和

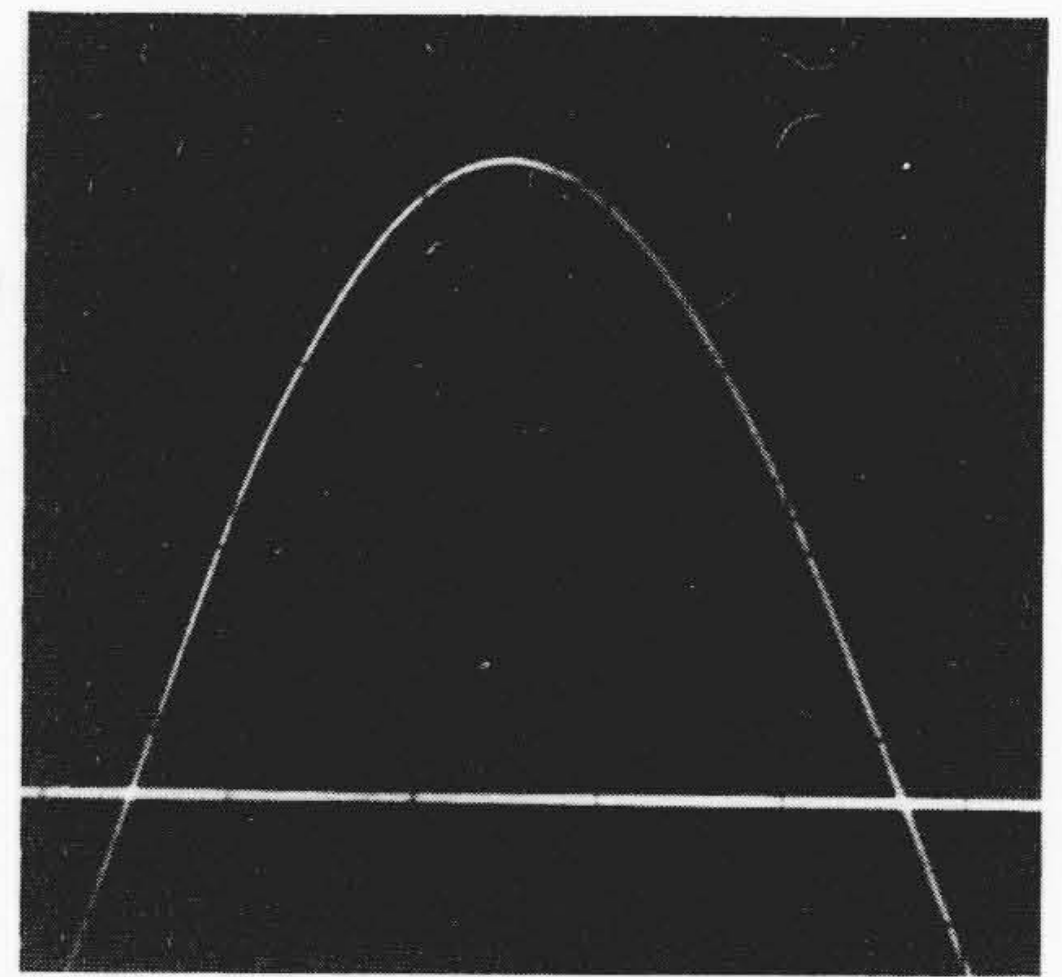


図9 極数変換後の電圧波形(12極)

28年以来検討してきた数例に及ぶ試験機の特性解析の経験に基づき設計を進めてきた。その結果、計算値と実測値がほぼ一致することが確認され、ほぼ予定どおりの結果を得た。日立製作所独得の極数変換方式が素波里発電所において実用化され、昭和45年12月以来順調に営業運転していることは今後この種の機種計画に際し有力な参考資料になるものと思う。

終わりに本機製作にあたり、貴重なご意見、ご協力を賜った秋田県企業局の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 鈴木、高橋、日立評論：43、2147～2153（昭36-12）



特 許 の 紹 介



特許第550620号（特公昭42-13378号）

住友金属工業株式会社：小野正久・野田昌弘
日立製作所：北之園英博・中西博

熱間圧延機における圧延速度上昇時の巻取温度予測制御方法

この発明は熱間圧延機における圧延材の巻取温度の制御において、巻取開始後に圧延速度上昇が行なわれる場合の予測制御に関するものである。

従来の巻取温度制御は巻取温度を検出して冷却水量を調整する単なるフィードバック制御や、仕上り温度、圧延速度等を測定し、これらに見合った予測制御であった。しかし、これらの方法は制御遅れのため制御不能となったり、速度変化に対する適切な補正が行なわれないため、所望の温度に冷却されずに巻取られるという欠点があった。

そこで、本発明は、図に示すように、圧延速度、速度上昇に要する時間、仕上り厚さなどに応じて、速度上昇時点前にあらかじめ冷却水量を増加させるようにしておくようにした。

図においてbは仕上り温度、圧延速度および仕上り厚さに応じ算出される冷却水量を示すもので、aは速度上昇にそなえて、あらかじめ冷却水量を増加させたものであり、aからbを差引いた斜線の部分の冷却水量を補正する関数発生器が特徴となっている。

この関数発生器により、前記計算値bの補正を行なうため、巻取り温度の上昇を防止し、一定に保つことができ、品質の良好な圧延

材を得ることができる。

なお、本発明は住友金属工業株式会社との共同出願である。
(松沢)

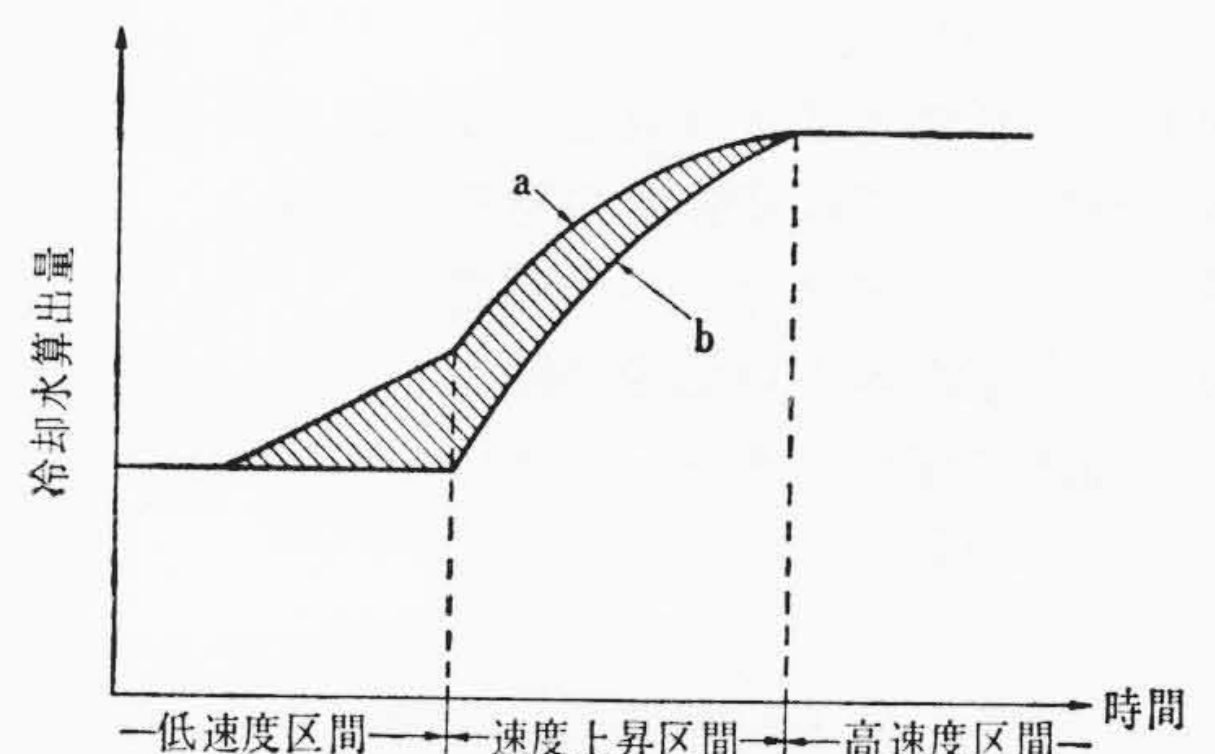


図 1