

大容量タービン発電機の進相運転

Under-excited Operations of Large Turbine-generators

西 政 隆* 川 村 隆* 奥 田 宏 史**
Masataka Nishi Takashi Kawamura Hiroshi Okuda

要 旨

タービン発電機の進相運転には、固定子鉄心端部の過熱と安定度との問題がある。特に前者は複雑な境界面を有する固定子鉄心端部の磁束分布および渦電流分布を電磁界の基礎方程式より解く必要があるため、従来は主として現地試験あるいは工場試験結果より進相運転の可否を推定するのが普通であり、理論解析はほとんど行なわれていなかった。今回日立製作所では、厳密な理論解析に成功し、7台のタービン発電機の現地進相運転試験結果により理論解析の手法の正しいことを確認したので、ここにこれを紹介し、あわせて設計上の固定子鉄心端部過熱防止の対策を述べたものである。

1. 緒 言

電力需要の急激な増大に伴い、大容量の火力・水力発電所が續々建設されるとともに超高压送電線や超高压ケーブル送電線が増強されてきた。このような系統の変化は充電容量の増大ひいては無効電力発生源の増大をもたらした。この無効電力は負荷の増減にはほとんど無関係のため、特に軽負荷時に無効電力が余剰となり、系統電圧が上昇する傾向にある。分路リアクトルや調相機による無効電力吸収には限度があるため、発電機とくに大容量タービン発電機を低励磁で進相で運転することにより、この無効電力を吸収するのが系統電力調整に最も効果的な方法である。

しかるにタービン発電機の進相運転には次のような問題がある。

(1) 安定度の低下

低励磁運転のため発電機の同期化力が減少することに起因するもので、系統条件と関連して検討されるべきものである。一般的には速応性連続形自動電圧調整器の採用により動態安定限界まで運転範囲が広げられるようになったため、固定子鉄心端部過熱ほどには進相運転の大きな問題とならなくなった。

(2) 固定子鉄心端部の過熱

進相低励磁運転のため鉄心端部における漏えい磁束の量が著しく増大し、鉄心端部および鉄心押え板に大きな渦電流を誘起し、その部分の温度上昇が大きくなるものである。

このうち(2)の問題については、固定子鉄心端部の構造が複雑なため従来は厳密な理論解析はなされていなかった。今回、電磁界の基礎方程式から鉄心端部各部の漏えい磁束分布を求め、それにより各部の渦電流分布、損失分布を得て最終的に温度上昇分布を得る解析方式に成功したので、その計算結果と実際に行なわれた現地試験結果とを比較して説明し、温度上昇に影響を及ぼす設計上の各項目についてさらに説明する。

2. 固定子鉄心端部温度上昇の原因および対策

2.1 端部の構造

図1に発電機固定子鉄心端部構造の一例を示す。図中①は固定子鉄心であり、大形機では方向性けい素鋼板を使用し図のように段落しをし歯部にスリットを切るものが多い。鉄心を締め付け固定させるのが⑫のエンドフィンガおよび③の鉄心押え板であり、大きな渦電流損を発生するものでもある。②が固定子コイル端部、⑧が界磁コイル端部であり、②は⑤のコイル支持リングおよびリング支えにより固定され、⑧は⑨のリティエニングリングにより保持されており、

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

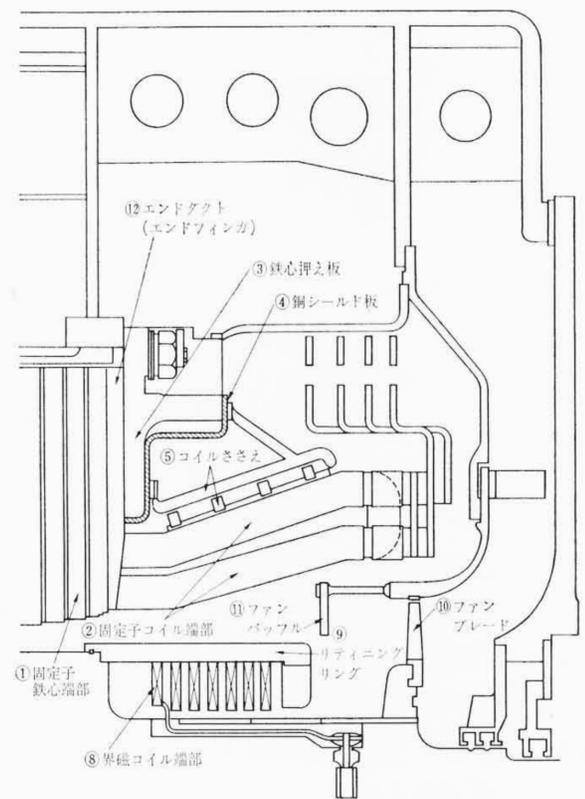


図1 固定子鉄心端部構造

おのおの端部漏えい磁束に大きい影響を及ぼす。

2.2 端部温度上昇の軽減対策

タービン発電機など2極機にほとんど固有の現象として3.に詳述する機構で固定子端部の構造物に大きな渦電流損が発生する。以下にその軽減対策を述べる。

(1) 銅板シールド

鉄心押え板などの大きな構造物に流れる渦電流はある範囲内ではその材料の固有抵抗に無関係におおむね一定値となる傾向がある。そのため図1中にもあるように鉄心押え板の表面に固有抵抗の低い銅のシールド板を設けて、発生損失を軽減し、また熱伝導率もよい局所的な過熱の防止もできる。銅シールド板中の渦電流のつくる逆方向磁界は、電機子および界磁コイル端部のつくる漏えい磁束の大部分を打ち消し、かつ鉄心内部への磁束の浸透を防止するとともに、固定子コイル端部内での漂遊負荷銅損を減少させる。

(2) 鉄心端部のスリット

端部鉄心の歯部にスリットを切り渦電流の流れる面積を減少させるもので、スリットを1個切るだけで発生損失を約1/4に減少できる。歯幅の小さい発電機では特にスリットを設けないことも多いが、歯幅の大きい大容量機ではこの効果は大きく、歯部を3分割するものもある。

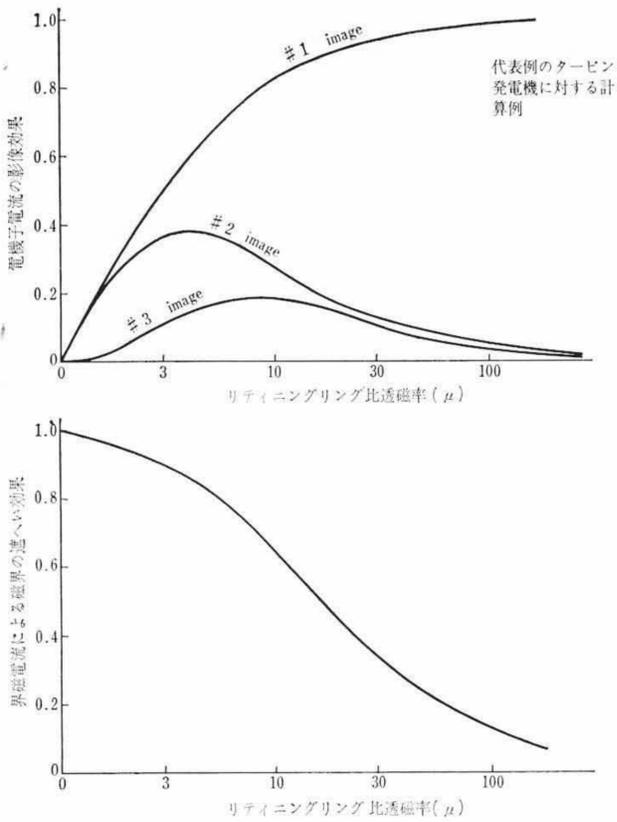


図2 リティニグリングの磁性の影響

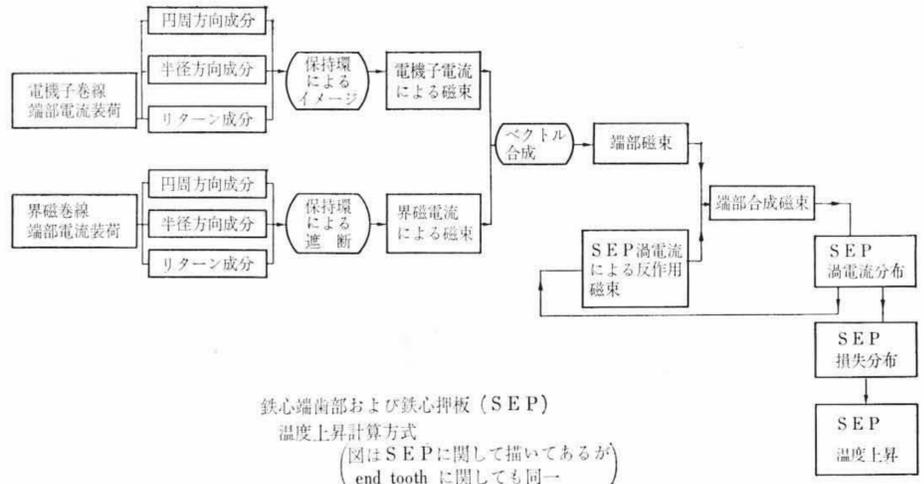


図3 温度上昇計算式
鉄心端歯部および鉄心押板(SEP)温度上昇計算方式
(図はSEPに関して描いてあるが end tooth に関しても同一)

図3 温度上昇計算式

おのおのの巻線端部の起磁力が鉄心端部につくる漏えい磁束を求めるところから計算が始まる。電機子巻線端部の円すい面の形状は、電流表荷の円周方向成分、軸方向成分、半径方向成分を考慮して等価置換され、さらに空げき部での磁界条件を与えるためにリターン電流も考慮、磁性体のリティニグリングの場合には影像効果を考慮して、それらの全体が鉄心端部につくる磁界をビオ・サバルの法則により求める。界磁巻線については、リティニグリングが遮へい効果をする(図2)ことだけが違いであり、電機子巻線界磁巻線のおのおのが鉄心端部につくる磁束が図3のように求められる。空げき磁束に関しては、電機子電流による磁束と界磁電流による磁束とのベクトル合成は図4のように普通の電圧ベクトル図と相似形となるが、端部漏えい磁束ではおのおのの磁束はリラクタンスの違いから図4の(c)(d)のように電圧ベクトルに相似でなくなり、合成漏えい磁束はとくに進み力率側で大きく増加する。

ふたたび図3で、ベクトル合成された端部磁束分布から鉄心押板あるいは鉄心端歯部の渦電流分布を求める際に注意すべきことは、実際の端部漏えい磁束は各部での渦電流により大部分打ち消された後のものであるということであり、したがって渦電流分布図3のようにループをとって繰返し計算を行なわねばならない。

コイル端部を軸方向に数多く分割して考え、また何項もの影像を考え、かつループをとって繰返し計算をするために必然的にデジタル計算機にたよらざるを得ず、以下の計算も3種類のプログラムを作成して計算機で行なったものである。

渦電流分布が求まった後は、損失分布が求まり、鉄心押板の場合なら内部での熱伝導、外側表面からの熱放散、内側エンドフィンガ側への熱放散を考慮して温度上昇は求められる。歯部でも考え方はほぼ同一である。

(3) 非磁性材料の採用

鉄心押え板、エンドフィンガ電機子コイル端部支持部分など損失の発生する個所では磁束の集中を避け、端部漏えい磁束通路のリラクタンスを増加させる意味で非磁性の材料を採用する。

(4) 非磁性リティニグリングの採用

リティニグリングは、磁性材料を使用すれば漏えい磁束の通路となり、また影像効果により電機子起磁力による漏えい磁束を増加させる。非磁性材料を使用すれば、温度上昇値を磁性材料を使用した場合の約1/2程度にまで減少させることも可能である。

(5) 鉄心端部の段落し

鉄心端部のパケットでは数段の段落しを行ない、歯部先端への磁束の集中と局部過熱を防止するもので、段落しにより歯部先端での磁束を約半減できる。

以上の温度上昇軽減対策を、発電機の容量、冷却方式により適宜使いわけている。

3. 温度上昇の理論解析

3.1 デジタル計算機による解析

まず考えている運転条件での電機子巻線電流、界磁巻線電流から、

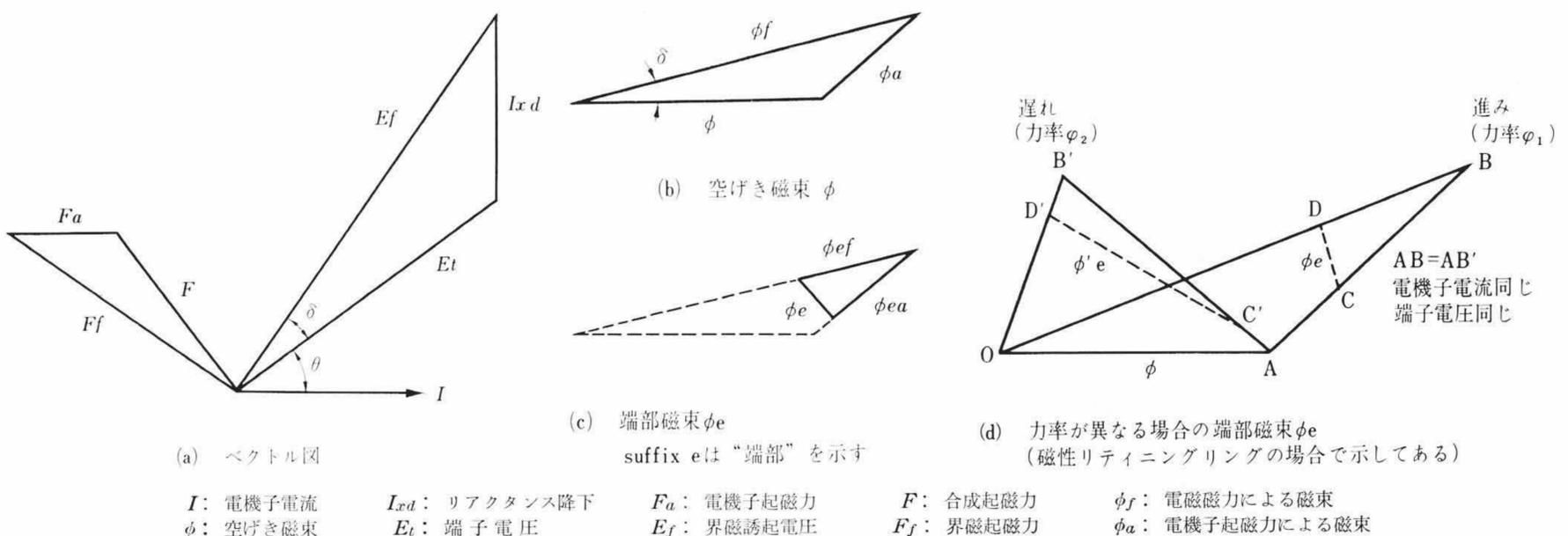


図4 ベクトル図

I: 電機子電流 Ixd: リアクタンス降下 Fa: 電機子起磁力 F: 合成起磁力 phi_f: 電磁磁力による磁束
phi: 空げき磁束 Et: 端子電圧 Ef: 界磁誘起電圧 Ff: 界磁起磁力 phi_a: 電機子起磁力による磁束

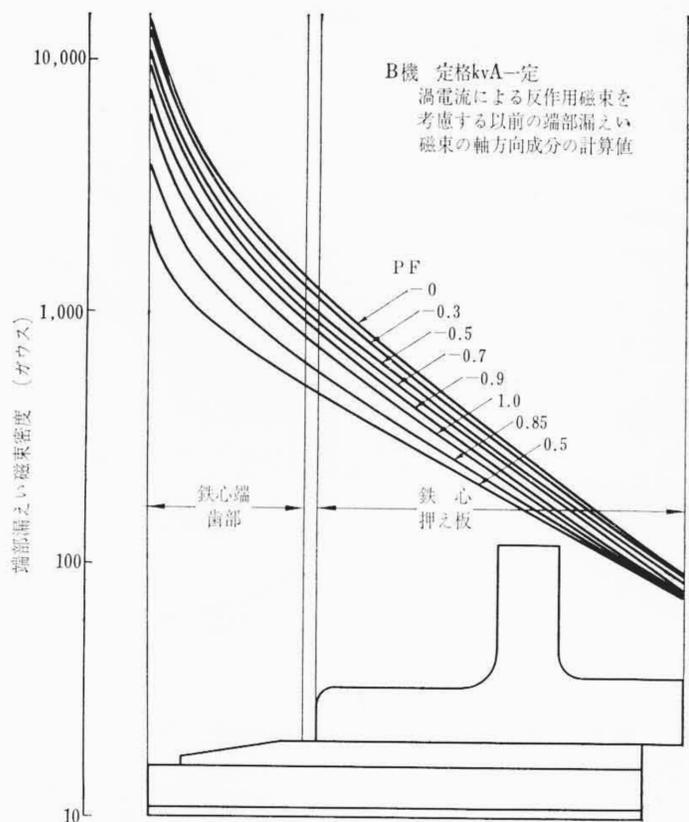


図5 端部漏えい磁束密度分布(B機)

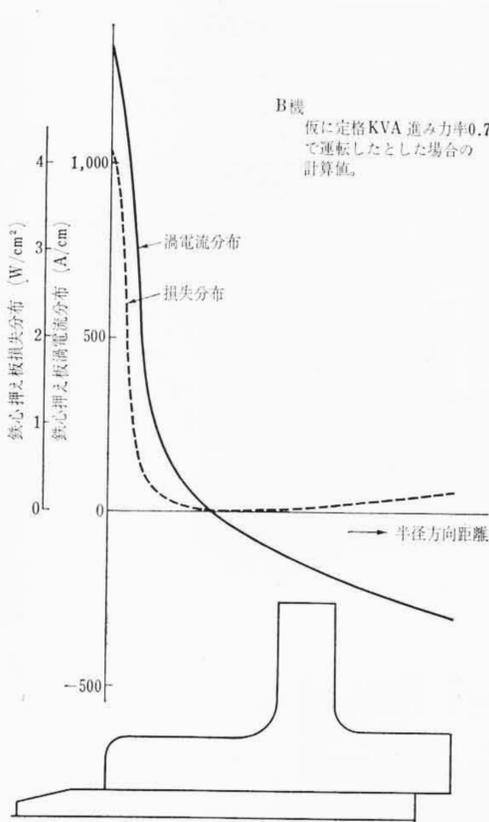


図7 鉄心押え板渦電流分布(B機)

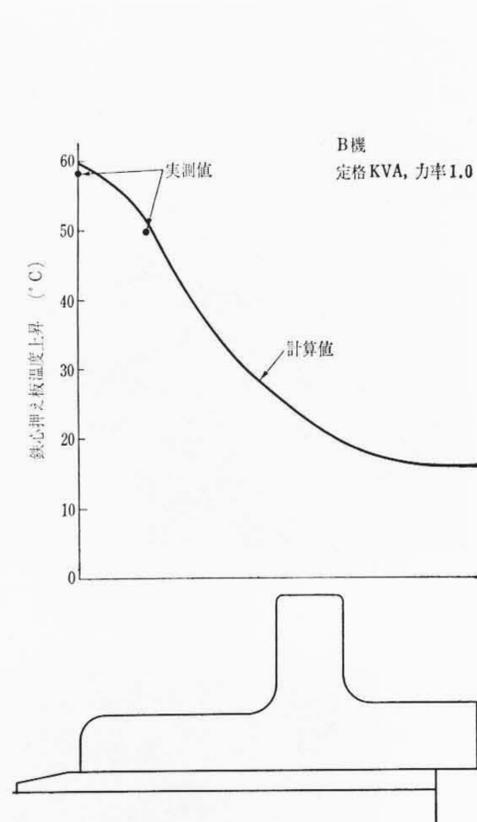


図9 鉄心押え板温度上昇分布(B機)

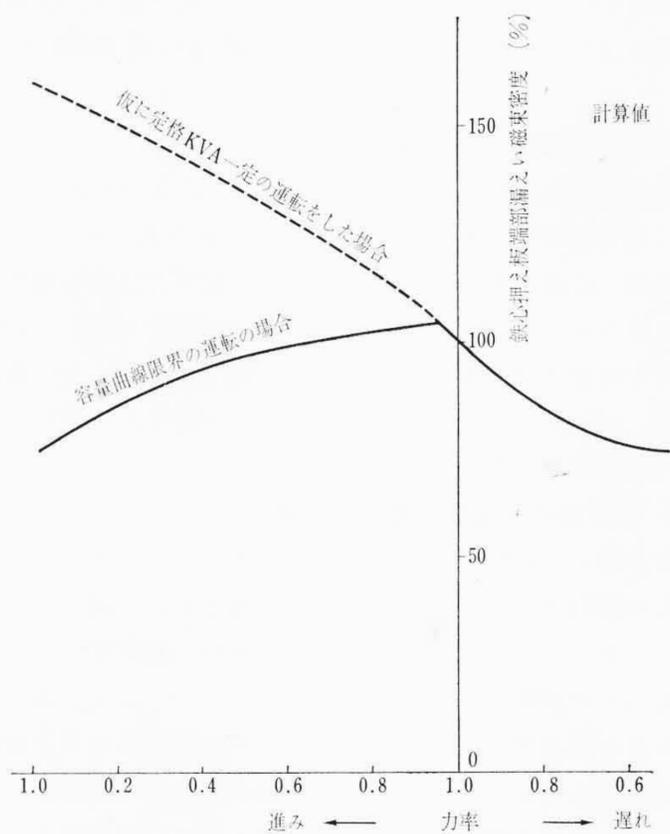


図6 鉄心押え板漏えい磁束(B機)

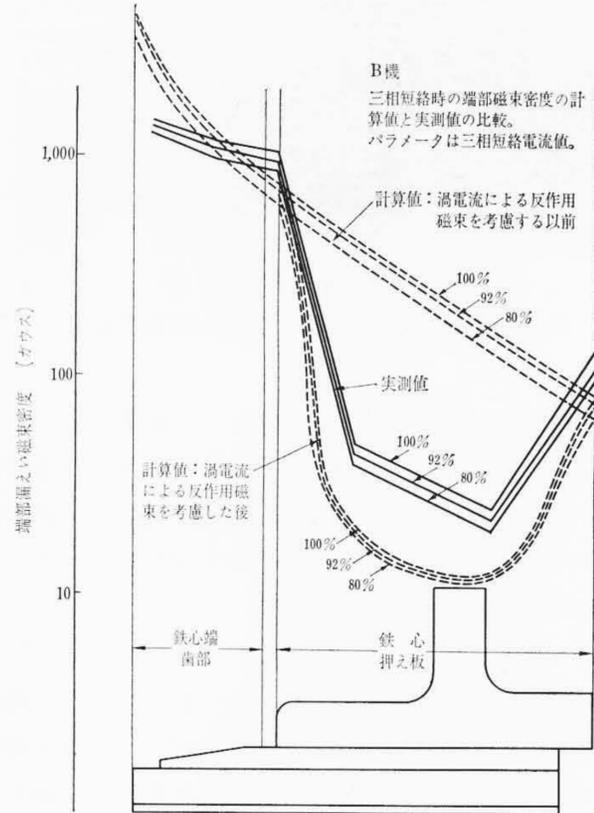


図8 端部漏えい磁束実測と計算の比較(B機)

代表的な計算例としてB発電機につき、力率をパラメータとした端部漏えい磁束密度分布、鉄心押え板内での渦電流分布、損失分布について示したのが、図5～図7である。

図5は鉄心押え板の渦電流による反作用を考慮する前の端部漏えい磁束密度であり、鉄心歯部先端に近づくとき大きく増加することがわかる。図6は図5から鉄心押え板部分の漏えい磁束密度を力率に対して書き換えたものであり、進み力率側では出力を制限しなければならないことが推定できる。

この漏えい磁束に対して図3のようにループを取って繰返し計算した結果得られた渦電流分布、損失分布が図7である。鉄心押え板では損失が内縁に集中していることがわかる。

これらの計算値に対し、渦電流分布あるいは損失分布は実測が非常に困難であるが、漏えい磁束密度は磁束密度測定用サーチコイルにより実測できるから、工場試験の三相短絡試験時に実測した漏えい磁束密度と計算値とを比較して示したのが図8である。比較的に

一致を示している。

さて、このようにして得られた損失分布から温度上昇分布を鉄心押え板に関して求めた例を図9に示す。損失が内縁に集中しているのに対して、温度上昇は半径方向の熱伝導のためその傾向がやややわらいではいるが依然内縁が最高温度となることがわかる。同図は銅のシールド板を用いない場合であるが、もし用いれば当然温度はさらに均一化される。

鉄心歯部、鉄心押え板のおのおのに対して温度上昇と力率との関係はこれを4.にまとめて述べる。

3.2 電解槽による模擬解析

デジタル計算機による解析と並行して、現在さらに電解槽による模擬解析を行なっているのでこの方法について少し詳しく述べる。

2次元磁界または軸対称磁界はラプラス形の電位関数と同じ問題となり電解槽を用いて模擬できることはよく知られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし発電機端部磁界は3次的に分布する。このため磁界はポアソ

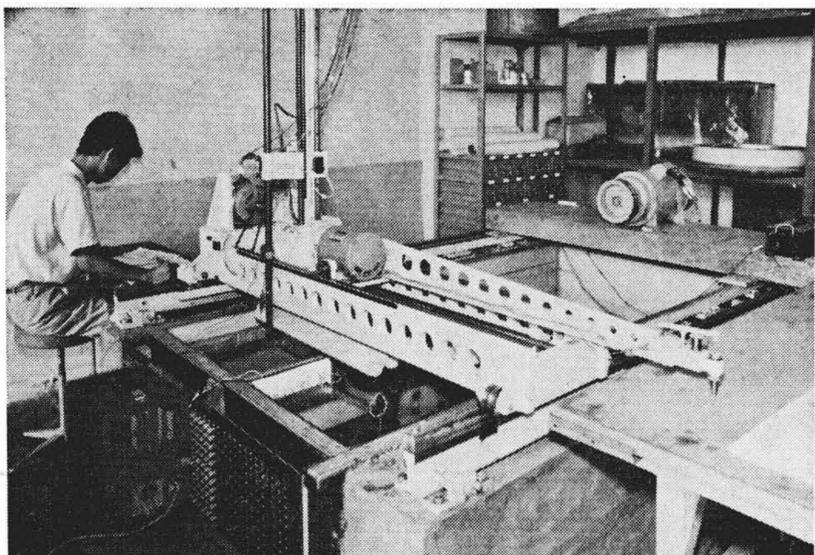
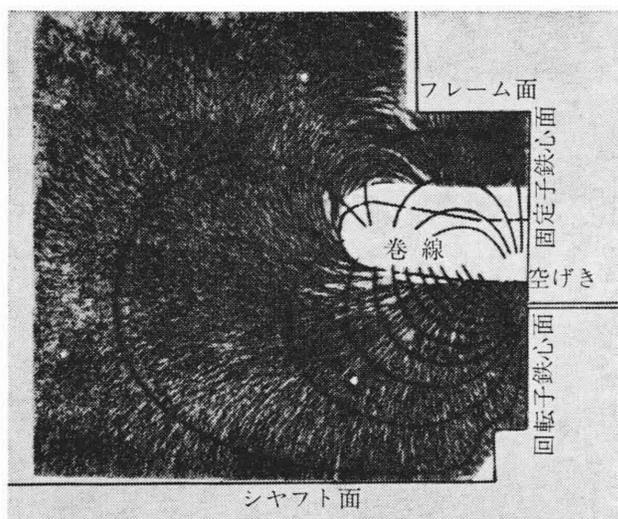


図10 電界解析装置



(曲線は電界槽で測定した等磁線を示す)

図11 鉄粉法による誘導電動機端部磁界

ン形の電位関数となるが、やはり電解槽で模擬することができる。しかしこの方法ではモデルの製作が複雑となってあまり実用的ではない。われわれはこの欠点を除くため2極機の場合について検討し、ラプラス形の式に変形して実用的な模擬方法を開発した。以下模擬理論および測定結果について述べる。

3.2.1 模擬理論

タービン発電機の端部構造は軸対称であるため円筒座標系を用いる。電解槽中では起電力が起磁力に対応し、電流が磁束に対応する。また巻線起磁力は基本波成分だけを考え、これが円周方向に正弦波的に分布するものとする。空間の磁界は磁位 Ω により(1)式で表わされる。

$$\mathbf{H} = -\text{grad}\Omega \dots \dots \dots (1)$$

また Ω はラプラスの式を満足するため(2)式が成立する。

$$\nabla^2 \Omega = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} = 0 \dots \dots (2)$$

ここで起磁力は円周方向に正弦波分布をするから磁位 Ω も正弦波分布をし、(3)式で表わされる。ただし2極機を考え $p=2$ とする。

$$\Omega = \Omega' \cos \frac{p}{2} \theta = \Omega' \cos \theta \dots \dots \dots (3)$$

(3)式を(2)式に代入して整理すると(4)式が得られ2次元問題となる。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Omega') \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \Omega') \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\rho=r$(5)

$$V=r\Omega' \dots \dots \dots (6)$$

とおけば(4)式は(7)式となる。

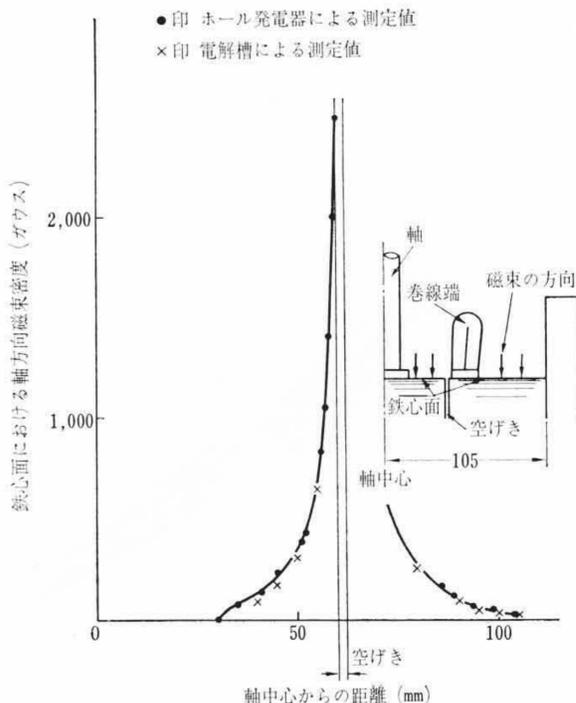


図12 鉄心面上の軸方向磁束密度

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial rV}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial rV}{\partial z} \right) = 0 \dots \dots \dots (7)$$

(7)式は明らかにラプラス形の電位関数の式であり、電解槽のタンク深さは $1/r$ に比例させればよい。図10は電界解析装置である。

3.2.2 巻線起磁力および磁位分布

巻線起磁力は巻線端の current sheet⁽⁴⁾ により求めることができる。電解槽中では起磁力は起電力で表わされ、その大きさは $(r \times \text{mmf})$ に比例するようになる。この起電力は鉄心端部の空けき部で最大となり、巻線に沿って減少して巻線の頭部で零となる。起電力を分布させる手段として多数の変圧器を用いた。測定するときは、(6)式からわかるように V/r が一定である点をプロットすれば等磁位線が得られる。

3.2.3 境界条件および渦電流の効果

固定子鉄心、回転子、固定子わくおよびエンドカバーは透磁率無限大の材料でできていて等磁位であるとする。固定子わくおよびエンドカバー内には渦電流が流れ得るが、磁束密度の小さい場所であるため渦電流は無視してもよい。しかし固定子鉄心押え板には大きな渦電流が流れる。タービン発電機の鉄心押え板は磁束の浸透深さに対して十分厚いから固定子鉄心まで磁束がとどかない。このため鉄心押え板は磁束を完全に遮へいする働きがある。それゆえ鉄心押え板が非磁性ならば、比抵抗が零の物体と同じ効果を示すから電解槽中では電流を通さない絶縁物で置きかえることができる。鉄心押え板中の半径方向および円周方向渦電流は、絶縁物体の表面の電位分布を測定し、そのこう配より鉄心押え板厚さ方向の積分値として求められる。磁束の浸透深さは既知であるから、渦電流はこの浸透深さに分布しているとして渦電流損を求めることができる。

3.2.4 電解槽法と実測の比較

上述の理論を実測値と比較するため、まず2極誘導電動機の固定子を用いて磁束分布を実測した。電機子巻線に直流電流を流して誘導電動機端部断面の磁界分布を鉄粉法で求めたものが図11である。図中には電解槽によって模擬測定を行なって求めた等磁位線を記入してある。図11より鉄粉の方向と等磁位線が各部で直交しており、電解槽による磁束分布は実測とよく一致することがわかる。図12には電解槽で求めた磁束密度とホール発電器で実測した磁束密度を示してある。両者は数値的にもよく一致することがわかる。結局磁束の分布状態および磁束密度とも正確に模

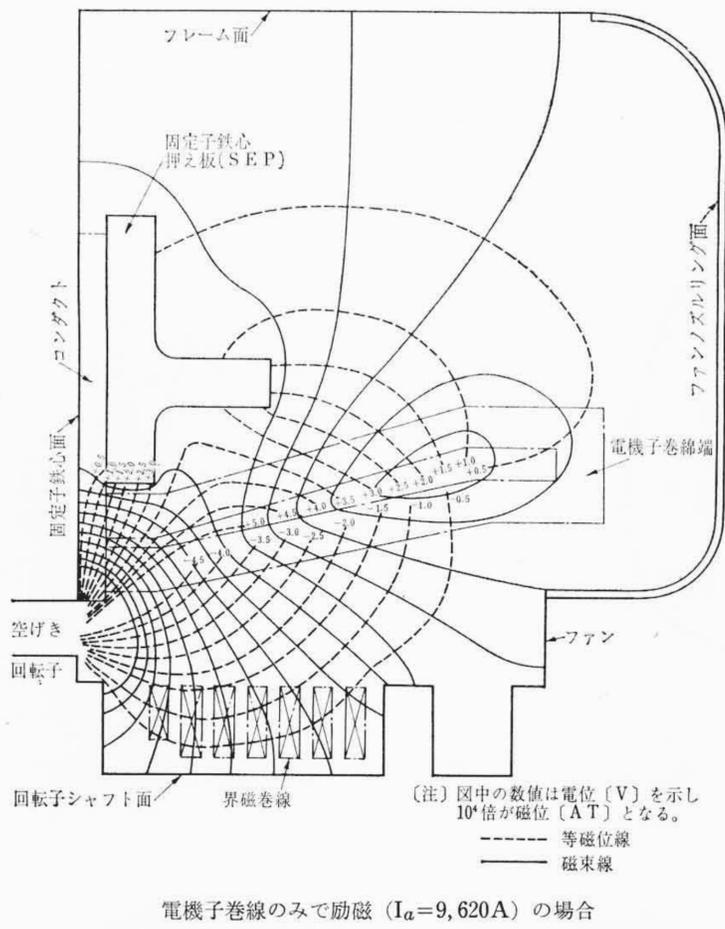
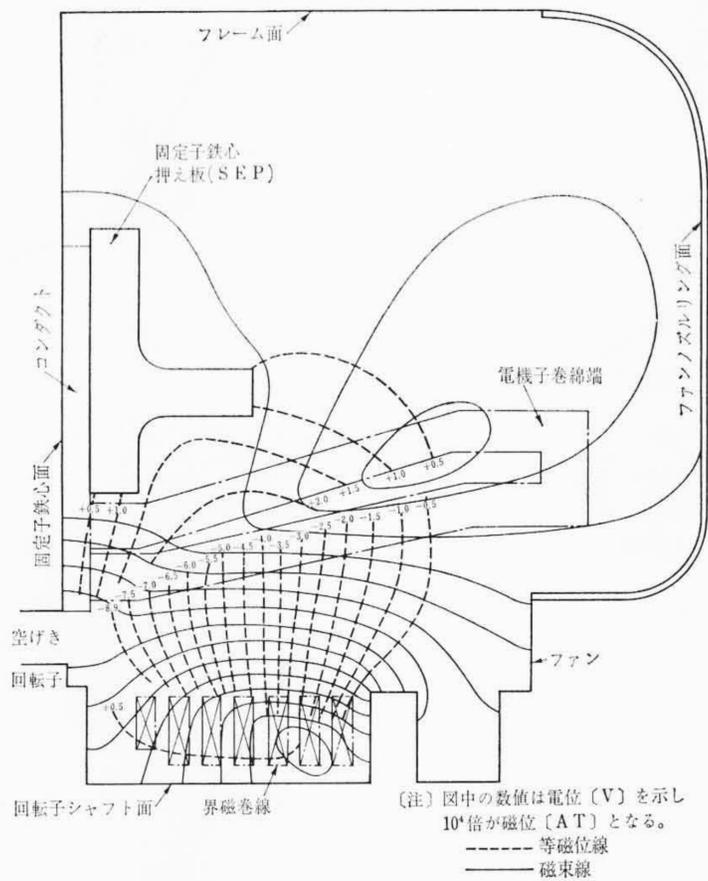


図13 渦電流がある場合の等磁位線および磁束分布



電子式巻線電流定格 9,620 A, 90度遅れ位相, 界磁巻線電流は 1,740 A で空けき磁束は零の状態を示す

図14 渦電流のある場合の等磁位線および磁束分布

擬されていることがわかる。

3.2.5 タービン発電機端部の模擬測定結果

電解槽を用いてタービン発電機端部の磁束分布を測定した例を図13, 14に示す。ただし図中のファンノズルリング面は渦電流により磁束が完全に遮へいされている場合である。図13は電機子巻線に定格電流を流し、界磁電流零の場合の磁束分布を示す。固定子鉄心押え板を非磁性化すれば、渦電流による磁束の乱れる様子がよくわかる。図14は三相短絡定格電流の状態、界磁電流は電機子作用を打消すだけの値である。ゆえに空けきの磁束密度は零であり、この状態で電機子巻線に鎖交する磁束（電解槽中

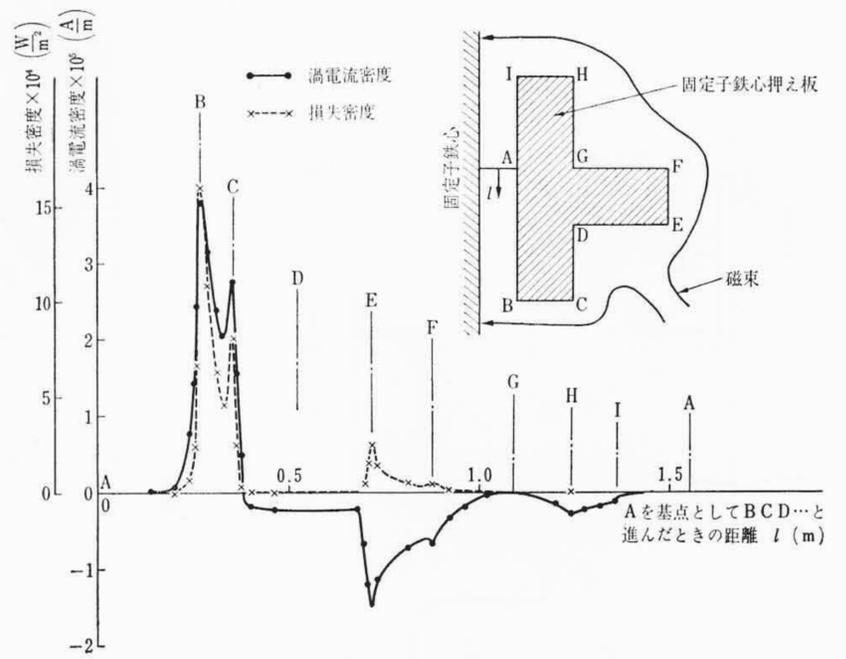


図15 固定子鉄心押え板中の円周方向渦電流分布および損失密度分布

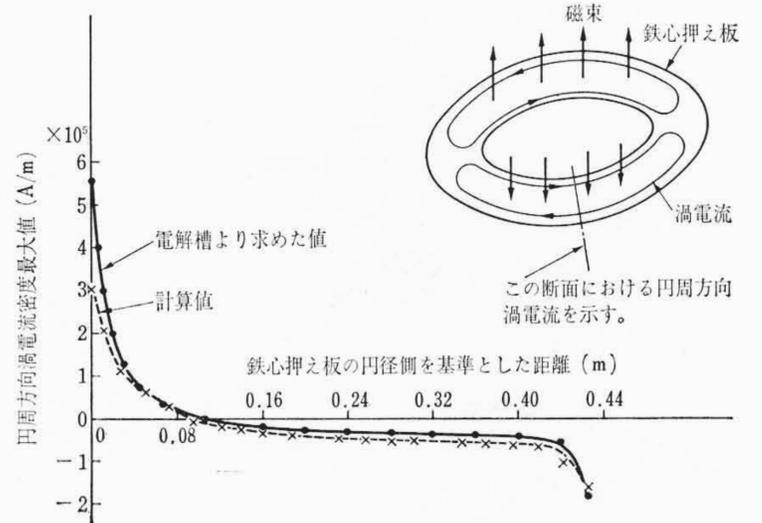


図16 固定子鉄心押え板の円周方向渦電流分布

では巻線部を流れる電流)を測定することにより電機子巻線端部のリーケージインピーダンスを求めることができる。

図13の状態固定子鉄心押え板中の渦電流を求めると図15のようになる。図中に損失密度の値も記されている。固定子鉄心押え板に発生する損失は図15のBC面およびEF面に集中していることがわかる。

3.1で述べた計算による渦電流の値と電解槽によって求めた例につき比較すると図16のようになり、かなりよい一致を示している。磁束密度の値についても計算値と電解槽による値とはよく一致することを確認したがここでは省略する。

なお渦電流が流れた場合の磁束分布および渦電流損の実測については現在実験計画中であり、電解槽で求めた値と比較する予定である。

4. 現在までに行なわれた進相運転試験の結果と解析結果との比較

現在までの進相運転の現地試験は一部日立製作所の協力のもとに各電力会社で試験が行なわれ、大部分はそのまま引き続いて営業進相運転に進んでいる。

現地試験においては、熱電対を表面にはるかまたは保護管に入れて内部にそう入することにより温度測定を行なったが、その熱電対取付位置の一例を図17に示す。同図は半径方向位置のみを示す。円周方向に対しては、端部漏えい磁界が同期速度で回転する回転磁界であることから、理論上は各個所で同一の温度上昇となるはずであ

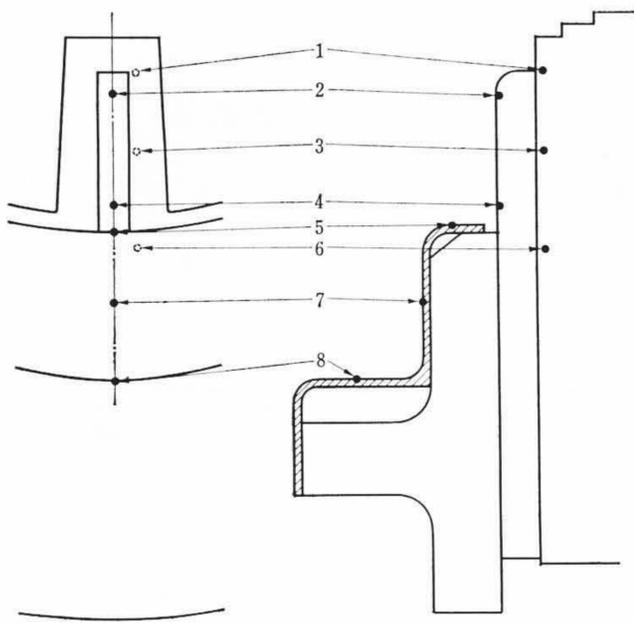


図17 熱電対取付位置の例

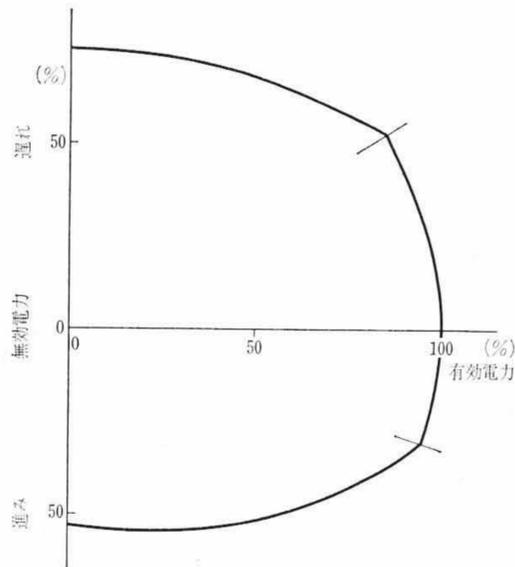


図18 容量曲線の例

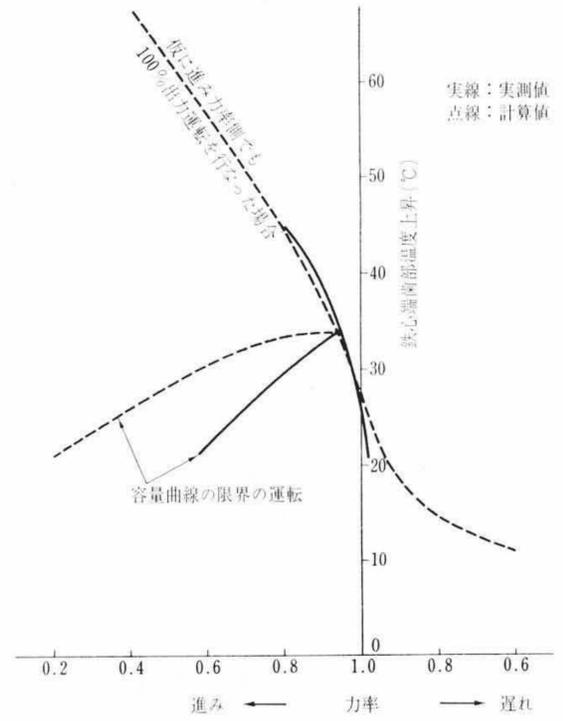


図19 鉄心端歯部温度上昇 (A機)

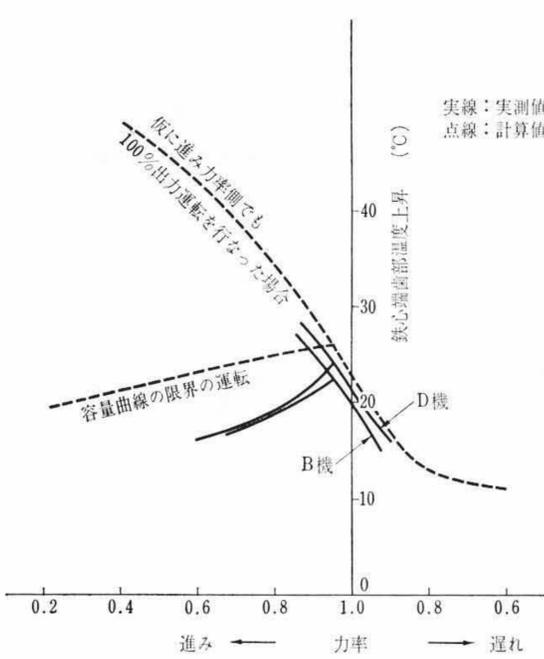


図20 鉄心端歯部温度上昇 (B, D機)

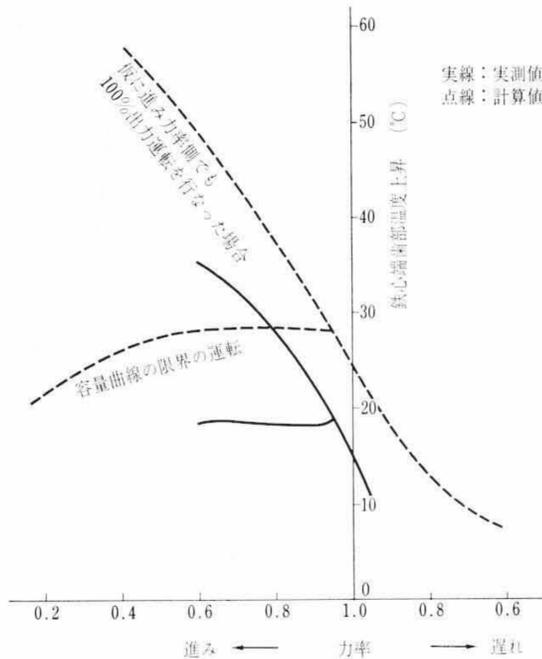


図21 鉄心端歯部温度上昇 (C機)

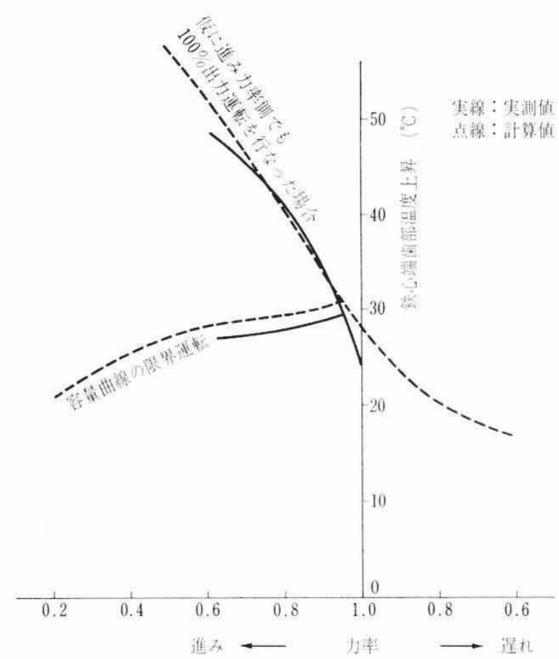


図22 鉄心端歯部温度上昇 (E機)

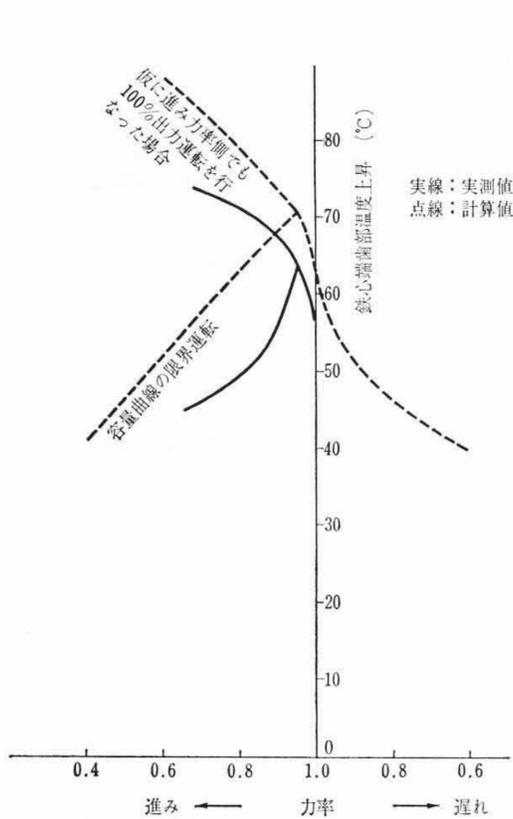


図23 鉄心端歯部温度上昇 (G機)

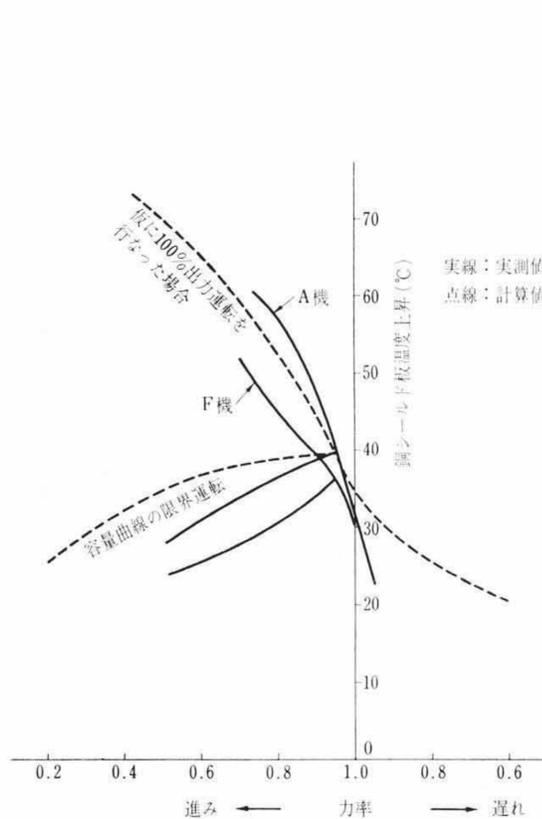


図24 銅シールド板温度上昇 (A, F機)

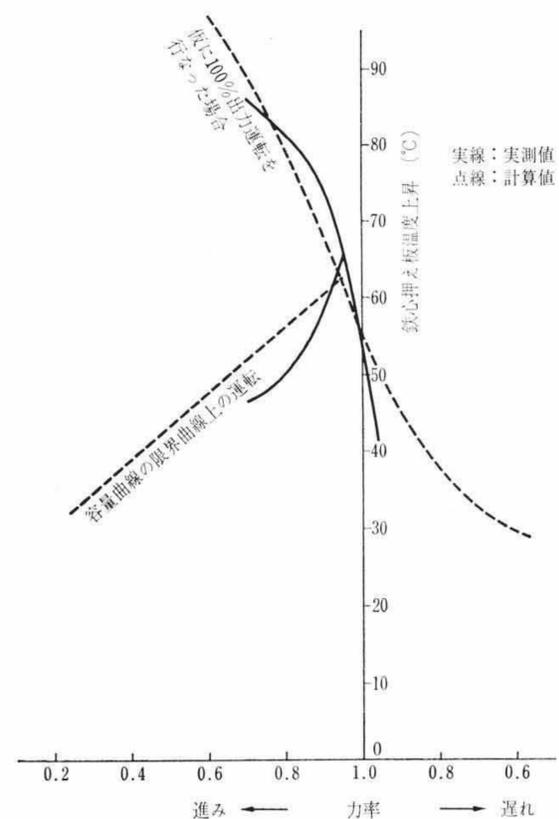


図25 鉄心押え板温度上昇 (C機)

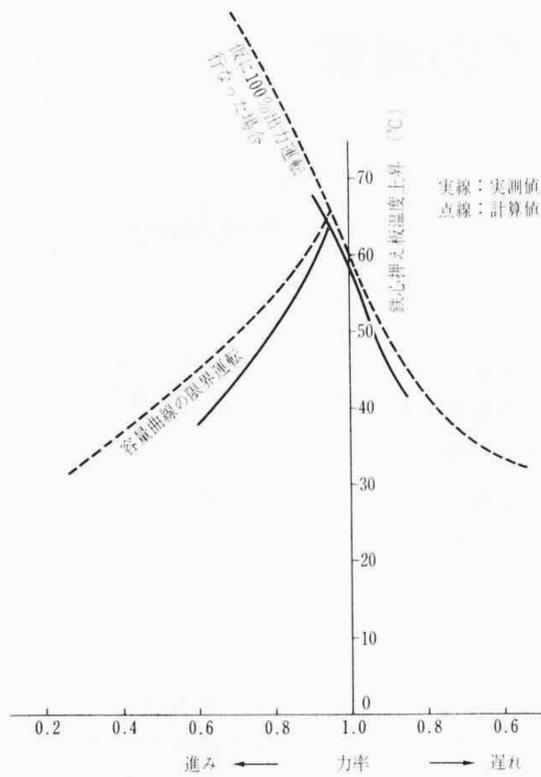


図 26 鉄心押え板温度上昇 (D機)

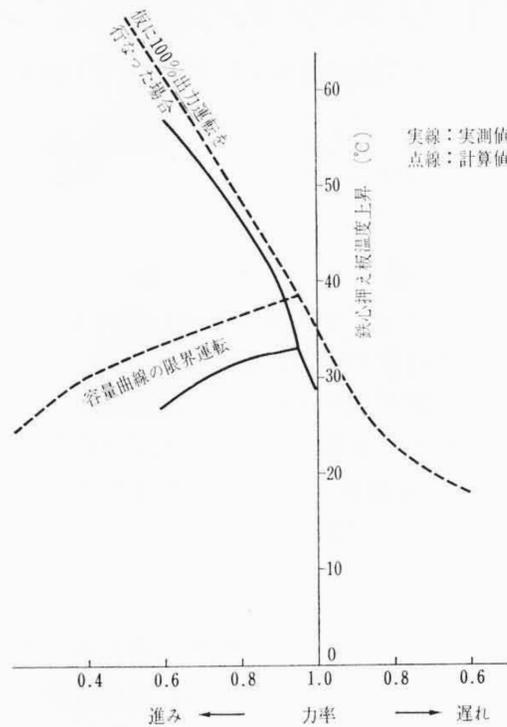


図 27 鉄心押え板温度上昇 (E機)

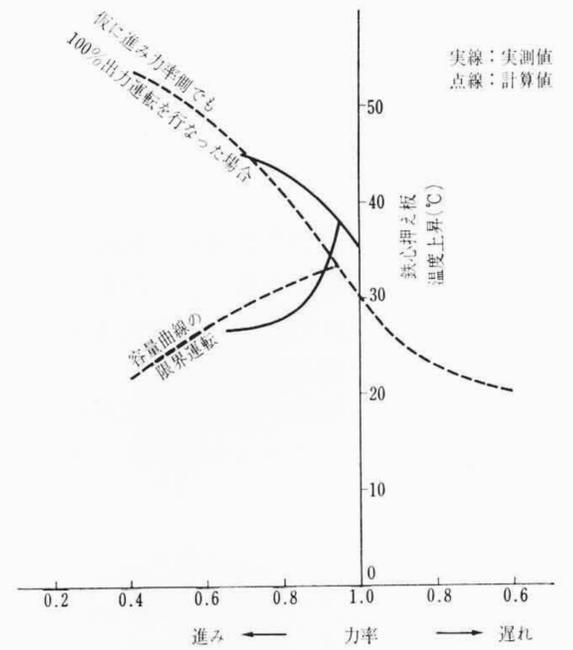


図 28 鉄心押え板温度上昇 (G機)

るが、実際は相間接続のわたり線の関係、電機子みぞ数の選び方によっては相帯端部でわずかに漏えい磁束が増すこともあり得ること、あるいはわずかな通風の不均一などにより、温度が異なることもあると考えられる。

現地試験を行なった発電機の鉄心端歯部、鉄心押え板のおおのの温度上昇値と計算値との比較を図 19 から図 28 に示す。実測値は鉄心端歯部あるいは鉄心押え板のおおのの最高温度を示すものを採っており、また必ずしも容量曲線限界で実測をしたとは限らないのでその場合は限界容量に推定換算したものである。計算値はいずれも 3.1 に記述した方式により求めたものである。

容量曲線の代表的な例を示したのが図 18 である。ここで進相領域でも端部過熱により容量制限をするのは力率がよい部分であり、力率が進みの零に近い部分では端部過熱よりはむしろ定態安定度により容量制限を行なっているものである。したがって図 19 から図 28 ではいずれの場合でも力率が進みの零に近づくと温度上昇は楽な側になっている。

進相側で仮に容量制限を行なわないときには、力率が悪い側で急速に温度が上昇してしまうことも同図からわかる。

鉄心押え板の内縁の温度上昇について計算値と実測値とを比較したのが図 24 から図 28 までであり、すべてにわたってよい一致がみられる。鉄心歯幅が特に広い G 機のみを例外として、すべての他の発電機では鉄心押え板の温度上昇値が鉄心端歯部の温度上昇値より大きくなっており、絶縁物に隣接するのが鉄心歯部であるところから、好ましい設計となっているといえる。また A, F 機では銅シールド板付であるためその温度上昇値は他の銅シールド板不付の発電機の鉄心押え板の温度上昇値と比較してかなり低い値を示し、銅のシールド板の有効性がうかがえる。

固定子鉄心端部の温度上昇に関しては、ASA 規格に規定があり (ASA C50. 13-1965 Table 2-(4)), 絶縁物に隣接する固定子鉄心端部の温度は普通水素冷却機で 110°C 以下、直接導体冷却機で 130°C 以下を許容値としている。発電機の実測結果は、容量曲線の限度内

にて鉄心端部温度はすべてこの許容値内にはいることを示しており進相運転に対する日立タービン発電機の設計方針が妥当であることが示された。

5. 結 言

以上の進相運転試験結果および触析結果を総括すれば次のようになる。

- (1) 固定子鉄心端部の漏えい磁束密度は、歯部先端で数千ガウス、鉄心押え板内縁で数万ガウスである。
- (2) 鉄心押え板内縁で渦電流密度は最大であり、損失密度も最大で数ワット/cm² 程度にもなる。
- (3) 鉄心押え板に銅のシールド板をつけること、鉄心端歯部にスプリットを切ることは、温度上昇を低く押えるために有効である。
- (4) 現行の容量曲線は力率が悪い部分は主として安定度の観点から限界を定めるため、温度上昇の面からは力率の悪い部分で楽になる傾向がある。
- (5) 現在までの現地試験結果では、日立製のタービン発電機の鉄心端部温度上昇値はいずれも ASA 規格の許容値にはいり、容量曲線内の進相運転が支障なく行なえることが判明した。

最後にいままで日立製作所の発電機に対し、現地進相運転試験を実施された東京、北海道の各電力会社および日本国有鉄道の関係者各位そのほかご協力いただいたかたがたに対し深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) H. K. Harr, W. R. Willson: AIEE Trans. 70, 1301 (1951)
- (2) 河合, 岩本: 三菱電機技報 37, No. 8, 72 (1963)
- (3) R. L. Winchester: AIEE Trans. 74, 381 (June 1955)
- (4) J. A. Tegopoulos: AIEE Trans. 81, 695 (Feb. 1963)