

氏 名 ^{たか}高 ^{はし}橋 ^{のり}典 ^{よし}義

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭 和 62 年 3 月 13 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 34 年 3 月

東北大学工学部電気工学科卒業

学 位 論 文 題 目 大 容 量 タービ ン 発 電 機 の 逆 相 耐 量 に 関 す る 研 究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 穴山 武

東北大学教授 豊田 淳一

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

系統事故時や不平衡運転時には、発電機の固定子巻線に回転子速度と同期しない磁界を生じる逆相電流が流れ、これが回転子導体に電流を誘導し損失を発生させる。逆相耐量とはこの損失による回転子導体の温度上昇耐力、つまり加熱耐力を表わしている。

昭和30年以降、系統システムの大規模化とスケールメリットの点から、タービン発電機の大容量化は急速に進展し始めるが、発電機の体格に対しては冷却や巻線支持などの新技術によりその増加を極力抑えるとともに、特に回転子外径寸法は機械強度上の制約もあってほぼ一定に保持する必要があった。すなわち発電機の大容量化は主として電気装荷（単位周長の電流）を大きくすることにより実現していかなるを得なかった。このため事故時などの逆相電流に起因する回転子の誘導電流による損失密度が電気装荷のほぼ2乗に比例して増大することになり、これによる導体の加熱温度上昇、すなわち逆相耐量が大容量化を図っていく際の主要な問題になってきた。

本研究ではこの課題に対し、解明の基本事項ともいえる逆相電流に起因する回転子の誘導電流や損失などの電磁気諸量及び過渡温度上昇を実際の回転子構造に即して定量的に評価できる計算式を導くことを中心に、測定検証および計算検討を通して大容量化に際しての逆相耐量の許容限界およびこれの改善向上を図ることを目的としている。

第2章 逆相耐量に対する説明の必要性と検討課題

タービン発電機の回転子は高速回転体であるため材料強度や製作上の制約があり、その構成は絶縁された界磁コイル以外の鉄心、ウェッジ、ダンパ巻線およびリテイニングリングなどの導体は部分的に相互に接触しており単純ではない(図1)。このため、これらの導体を通る誘導電流は導体材質や導体間の接触抵抗に応じて大きさと配分が異ってくる。したがって特定の部位では電流集中や損失密度の急増を招き、これが導体の熱容量や熱移動の大きさとも関連して過大な温度上昇を惹起し回転子の焼損や破損などの重大事故につながる。特に大容量機になるほど前記のように損失密度が増大するため温度的にも一層敏感になることが懸念され、発電機の信頼性および安全性の確保の点から逆相耐量に関する定量的な評価とこれの改善向上が重要な課題になってきた。これに対し本研究では、実際の回転子導体構成に即した電磁界解析により各部位ごとの誘導電流や損失密度を求め、これをもとに回転子の全域にわたっての温度上昇を求める計算式を導き、導体区分ごとにみた逆相耐量の評価ができるようにした。

逆相耐量の問題は故障時などの短時間加熱の場合と定常不平衡運転のような連続加熱の場合とに大別されるが、短時間の場合には大きな故障電流にもとづく加熱現象であるため冷媒への熱放散が期

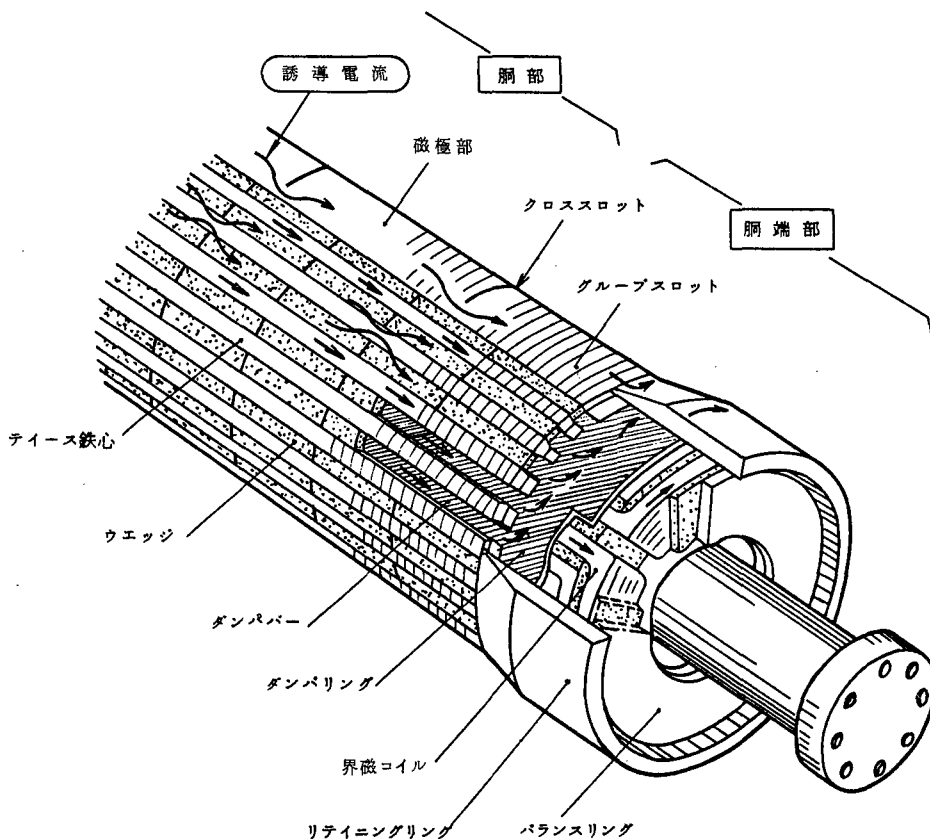


図1 回転子の導体構成と誘導電流の経路

待できず、制限を加えた連続加熱に比べて温度的に苛酷となる。本研究ではこの短時間の場合を対象としている。

短時間加熱に対する逆相耐量の巨視的な評価値として $I_2^2 t$ (I : 逆相電流 (p.u.), t : 故障の継続時間 (s)) が用いられている。回転子は許容温度の異なる種々の導体から構成されているので $I_2^2 t$ 値の許容値は限界に最も近い導体あるいは部位により規制されなければならない。本研究ではこの判定根拠を解析および測定により求め、大容量化に伴う逆相耐量の許容限界を明らかにしている。

逆相耐量に関する内外の研究開発は大容量の進展時期と呼応して進んだが、実機構造に即した検討が必要であること、また測定検証が大規模になることもあって主として製作メーカーが中心となっ
て行なわれてきた。そして論文における共通的な主な指摘事項として、導体間の接触部位で電食が
発生し注意を要すること、回転子の位置により温度上昇の大小差が大きく $I_2^2 t$ との関連を明確にす
る必要があること、また完全全長ダンパ巻線は改善に効果のあること、そして回転子の実構造に即
した解析検討の精度向上が必要であることなどをあげている。完全全長ダンパ巻線は逆相耐量の向
上策として回転子のほぼ全周面にわたって低インピーダンスの導体を装着する方式である。本研究
においてもこの方式の効果を他のダンパ巻線方式との比較において定量的に明らかにし、大容量化
に際して適用が必要となる容量区分を決めることを主要な目的としている。

逆相耐量に関連する検討課題全般としては、本研究で対象とした電磁界および温度上昇に関する
回転子の加熱耐量の問題のほか、回転子材料自身の微視的加熱強度、状態監視・予防保全、あるい
は系統・保護システムとの協調など多岐にわたる。いずれも発電機の大容量化に伴う信頼性確保の
観点からは重要であるが、そのうちで本研究は解明にあたっての基本事項の課題に属する。

第3章 実機回転子の導体構成を考慮した解析^{(1)~(5)}

解析では現行の回転子導体構成を大幅に変えないことを前提とし、実機の逆相耐量に影響する諸
要因、すなわち短ウエッジ、クロスロット、ダンパ巻線や胴端部などの形状要因、また導体間の
接触抵抗および鉄心透磁率の電流依存性あるいは誘導電流周波数などの状態変化要因を実状に即し
て考慮することにより回転子の各部位における逆相耐量の限界を適確に把握しうる計算式に導くこ
とを主眼に置いた。特にダンパ巻線に対してはこれの各種方式の比較が容易にできるよう配慮した。

電磁界解析は回転子の導体構成上、本来三次元解析が必要であるが、断面構成が変化しない無限
長胴回転子および実形状に即した各部位ごとの二次元解析をもとに、これらを連結した回転子等価
回路網の設定により全体として三次元的配慮をしていることが特徴である。これにより各要因の相
互影響を含めて逆相耐量に関連する諸量を回転子全体として、あるいは細部について定量的に比較
評価できるようにした。電磁気量としては誘導電流、磁束および損失、また誘導電流の効果を代表
的に表わす逆相インピーダンスを求める計算式を導いた。一方、温度上昇解析は回転子寸法を実質
的に制約する短時間加熱の場合を対象とし、電磁界解析により得られた損失密度をもとに各部位ご
との二次元解析により温度上昇の時間経過を求める計算式を導いた。これにより局部加熱を生じ易
い問題部位を含め回転子の全域にわたるそれぞれの導体区分ごとの温度上昇が定量的に求まり、巨
視的な逆相耐量の評価値 $I_2^2 t$ の許容値設定に対する判定根拠を与えることができるようにした。

第4章 計算値と測定値との比較⁽¹⁾⁽²⁾

解析式により求めた計算値を2500kVA逆相耐量試験機および各種の実用機からの測定値と比較した。

逆相耐量試験機は容量は小さいが電流、磁束および温度上昇を測定する多数の計測素子を取り付け、逆相耐量に関連した電氣的・熱的諸量の全般にわたって検証できるようにした。またダンパ巻線なしと完全全長ダンパ巻線の両極端の方式について測定を実施し、特に大容量化に必須と考えられる完全全長ダンパ巻線方式に対しては測定値と計算値との比較を詳細に示すとともに、この方式が温度上昇の低減と分布の均一化に効果のあることを実験的にも確認した。

一方、プロトタイプ機あるいは実機の方では試験機のように一貫した測定値が得られていないため断片的な比較となったが、それぞれの測定値に対して計算値が対応していることを確認した。対象機は大別して3種類である。すなわち、実用機を対象としたダンパ巻線方式の相異を中心に比較検討した670MVA-2極機、過大加熱温度上昇の場合の計算値検証に引用した110MVA-2極ダンパ巻線なし回転子焼損事故機および各種発電機に対する実測回転子損失と計算値との対応をみるために引用したBBC社機である。

第5章 逆相耐量の限界および改善に関する計算⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

測定値との比較より実用性を確認した計算式をもとに、タービン発電機として代表的な火力用2極機および原子力用4極機を対象として、短時間加熱の場合における逆相耐量の限界あるいは改善向上について種々パラメータを変えて計算検討し、最終的に発電機容量に対するダンパ巻線方式の適用区分を決めた。ダンパ巻線は比較的容量の大きい機械に適用してきた部分ダンパ巻線（端部のみにダンパ導体を装着）と完全全長ダンパ巻線の2方式に限定し、またパラメータとしては予備検討の結果より逆相耐量に影響の大きい逆相電流の大きさ、導体間の接触抵抗および熱伝達率を主要項目に選び、さらに改善方策としては実用効果が大きいダンパ導体厚みを中心に検討した。そして検討の結果明らかにした主な特徴内容を要約すると次のように整理される。

ダンパ巻線方式と逆相耐量との特徴的な相関として、部分ダンパ巻線方式は鉄心の電流負担が大きいため損失密度および温度上昇とも鉄心部が大きく、また周方向あるいは軸方向の位置による差が著しい。特に、短ウェッジの突き合わせ部位やリテイニングリングの焼きばめ部位などは逆相耐量の許容限界を左右する要注意箇所である。これに対して完全全長ダンパ巻線方式は鉄心の電流負担を大幅に軽減するほか、回転子損失の顕著な低減、鉄心と隣接する導体との移行電流低減など逆相耐量の向上に大きな効果を有する。ただしダンパ巻線の負担が過度にならないよう回転子全体としてのバランスのとれた設計配慮が必要であり、要注意箇所としては胴端部のダンパ導体である。

逆相電流の大きさは鉄心の磁気飽和特性の影響により透磁率の大きさ、したがって磁束浸透深さを変えるため、これが鉄心の電流負担割合のみでなく損失密度を支配する層の厚みと過渡的な熱容量の大きさをも変えることになり、結果的に各導体の温度上昇の時間経過に影響してくる。この影響はダンパ導体との相互負担の関係が密接な完全全長ダンパ巻線方式の場合が特に敏感であり、そして逆相電流が大きくなるほど過酷側に推移する傾向を有する。一方、導体間の接触状態が変わるこ

との影響は電流、損失および温度上昇の分布に対してその波及が広範囲に及ぶが、特に電氣的・熱的に隣接する導体との依存度の大きいダンパ導体が敏感であり注意を要する。

完全全長ダンパ巻線方式の場合、これの導体厚みを増やすとダンパ巻線の電流負担はさらに増えるが、ダンパ導体自身の抵抗が減り熱容量が増えること、また鉄心やウェッジ導体の損失低減が相加わり回転子全損失が低減すること、さらに導体間の移行電流が各部位にわたり低減することなどのため、要注意箇所である端部のダンパ導体も含め全体的に逆相耐量が向上する改善効果を有する。

回転子導体構成がほぼ同一とすれば容量の増加に対する逆相耐量の許容限界の推移は近似的に固定子定格電気装荷の2乗の逆数に比例した割合で減少する。原子力用は火力用に比べて固定子電気装荷を小さく設定するようにしているので同一容量では許容逆相耐量が大きくなる。そして一連の検討結果より総合的な結論として、発電機の大容量化にあたり火力用では700 MVA以上、また原子力用では1200 MVA以上において完全全長ダンパ巻線方式の採用が必要である。

第6章 結 言

第3章から第5章までの主な解明結果を要約した。さらに一層の大容量化および高出力密度化に対して残された問題点と対応策について言及した。

参考文献

- (1) N. Takahashi, T. Kawamura, M. Nishi "Improvement of Unbalanced Current Capability of Large Turbine Generators" IEEE Trans., vol. PAS-94, No. 4, (July/Aug. 1975)
- (2) 高橋, 川村 "大容量タービン発電機の不平衡負荷耐力" 日立評論, vol. 58, No. 3 (1976-3)
- (3) N. Takahashi, T. Kawamura "Unbalanced Loading Capabilities of Large Turbine Generators" Hitachi Review, vol. 25, No. 2 (1976)
- (4) 高橋 "エアギャップに面した塊状鉄心のうず電流" 電気学会雑誌, vol. 89, No. 973 (1969-3)
- (5) 高橋, 河井, 赤井橋 "高速車両レールうず電流ブレーキの解析" 電気学会雑誌, vol. 90, No. 2 (1970-2)

審査結果の要旨

近年、電力系統の大規模化に伴ない、タービン発電機の大容量化は急速に進展したが、発電機の回転子外径寸法は機械強度上の制約より一定に保持する必要があるために、大容量化は主として電気装荷を大きくする事により実現されてきた。このため系統事故時の逆相電流により回転子に誘導電流が流れ、導体温度が急激に上昇し、これによる焼損防止のための熱耐力の向上、即ち逆相耐量の向上が発電機大容量化の主要な問題となってきた。

本論文はこの問題を解決する目的をもって、理論と実験の両面から一連の研究を行ない、発電機の逆相耐量向上に役立つ有用な成果を得たもので、全編6章よりなっている。

第1章は緒言である。

第2章では、タービン発電機回転子の誘導電流について考察を行なっている。逆相電流による誘導電流は、導体材質や導体間の接触抵抗に応じて大きさが異なり、特定の部位での電流集中や損失密度の急増を招き、回転子の焼損や破損等の重大事故を招く経過を試作機及び実用機を用いて詳細に明らかにし、逆相耐量解析の為の基礎を与えている。

第3章では、実用機回転子の導体構成を考慮し、逆相耐量推定の解析手法について述べている。即ち短ウエッジ、クロスロット、ダンパ巻線や胴端部などの形状、導体間の接触抵抗及び鉄心透磁率の電流依存性或は誘導電流周波数などの状態変化要因を実情に即して考慮することにより、回転子各部における逆相耐量の限界を的確に把握し得る計算式を導いている。これは設計上極めて有用な知見である。

第4章では、逆相耐量試験機と多数の実用機から電氣的・熱的諸量の測定値を求め、これと計算値との比較を行ない、完全全長ダンパ巻線方式は、回転子の温度上昇の低減と温度分布の均一化に確実な効果を有することを明確にしている。これは優れた成果である。

第5章では、タービン発電機として代表的な火力用2極機及び原子力用4極機を対象とし、誘導電流による短時間加熱の逆相耐量限界或は向上についてパラメータを種々変えて計算し、具体的に発電機容量と対比して部分ダンパ巻線と完全ダンパ巻線の2方式の適用区分を明らかにしている。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、発電機の大容量化に伴う逆相耐量に関し、その基礎となる誘導電流による焼損機構を明確にし、逆相耐量の限界を推定できる理論式を導くと共に、逆相耐量の向上に役立つ成果を得たもので、電気工学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。