

氏名(本籍)	古川友三(新潟県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工第125号
学位授与年月日	昭和46年1月13日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和32年3月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 攻修士課程修了
学位論文題目	原子炉の核計装における対数出力ペリオド計 に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 相山 一典 教授 長尾 重夫 教授 松尾 正之 教授 真野 国夫

論文内容要旨

はじめに

フェイルセーフの原則と、より高い稼働性の要求とから、核計装の信頼度は非常に高いものであることが必要である。核計装において反応度計測系をなす対数出力ペリオド計は、約7桁の対数化と微分演算の機能とを有しており、そのため原子炉核計装中比較的信頼度の低い計装とされ、原子炉の誤スクラムの主要因ともなっている。本論文は核計装の高信頼化の研究の一環として行った対数出力ペリオド計に関する研究をとりまとめたもので、系設計の最適化のための時定数設計に関する検討と、その結果を利用し、かつ、高信頼化をねらって全半導体化された対数出力ペリオド計の開発研究を含んでいる。

第1章 総論

本研究の対象は原子力工学と電子工学の二分野にまたがっている。そこで、研究の意義と目的とを明確にするため原子炉核計装の概要、本研究を行うに到った経緯などを総論として述べた。1.1節は核計装の構成、機能などを原子炉の起動と対応させて概説している。1.2節においては核計装の信頼性と原子炉の安全性との関係を述べ、計装の故障統計を検討することによって、高信頼化するには核計装用計測器の半導体化が必須の条件であると結論した。1.3節においては対数出力ペリオド計は反応度の尺度としてのペリオド計測および原子炉の安全保護のための計装として重要であるにも拘らず、従来から信頼度の低い計装であるとみなされていたこと、したがって、いわゆる平均故障率でいわれる信頼度以前の問題として、対数出力ペリオド計の系設計上の問題を検討しておく必要があることを述べた。1.4節は本研究に関連した従来の研究を総括的に述べている。系設計に関しては、個々の特性を論じた文献はあるが、安全保護計装の立場から総合的に検討したものが殆んど見当たらない。全半導体化に関しては、いくつかの試みは発表されているが、特性において真空管方式に勝るものは出現していない。したがって本研究を遂行する意義は大きいものと思われる。

第2章 対数出力ペリオド計の時定数設計

対数出力ペリオド計の時定数およびスクラムレベルを設計する場合の基礎について論じている。我国における対数出力ペリオド計はオフノルマルレベルがノルマルレベルの5～10倍という、一般計装の常識からかけ離れた現状にある。これを少しでも一般計装の常識に近づけることができないかどうかを検討するのが本章の目的である。また、これまで対数出力ペリオド計の時定数決定の根拠が明確ではなかったので、併せて時定数設計の根拠を与えることが目的である。対数出力ペリオド計の時定数はペリオド計の応答速度を規定する他、中性子検出の確率過程にもとづくペリオド計の出力における“ゆらぎ”，および、指数関数的炉出力増加に対するペリオド計の出力におけるオーバーシュートと密接な関係をもっている。ゆらぎ、オーバーシュートに関しては従来からも個別には論ぜられている。安全保護計装としての対数出力ペリオド計の時定数設計をする場合には、これらの諸特性と時定数との関係を総合的に検討する必要がある。2.1節においては対数出力ペリオド計の問題点、時定数とゆらぎ、スクラム遅れおよびオーバーシュートとの関係を一般的に論じた。そして、設計を簡略化する手順として、時定数と解析の関係にある“ゆらぎ”を指標にしながら、スクラム遅れおよびオーバーシュートと時定数との関係を、規格化パラメータを用いた汎用図表にまとめておいて評価してゆく試行錯誤過程を提案した。2.2節においては、ペリオド計のゆらぎのいくつかの要因のうち検出の確率過程にもとづくゆらぎのみを検討すればよいことを確認した上で、Barrowらの行った解析を時定数設計に便利な形の表式に変形した。2.3節においては対

数出力ペリオド計の過渡応答を数値計算し、スクラム遅れによる原子炉出力のオーバーシュートと時定数の関係を評価する表、および、ペリオド計出力に現れるオーバーシュートと時定数の関係を評価する図にまとめた。規格化パラメータを用いる必要上、指数関数的炉出力増加に対する過渡応答とした。2.3節において明らかになった、ペリオド計の出力に現れるオーバーシュートが特定の規格化ペリオド値において最大値を取るという事実は筆者によってはじめて指摘されたものである。2.3節の結果を利用して、対数出力計の計測範囲外からの正常ペリオドの出力上昇によってペリオド計の出力に現れるオーバーシュートを検討したところ、このオーバーシュートのピーク値を許容し得る値以下におさえるためには、対数出力計の計測下限以下の領域において時定数飽和を行わせる必要があることがわかった。そこで2.4節においては実際に行われている時定数飽和の特性を半導体pn接合の飽和電流の効果で模擬し、過渡応答を規格化パラメータを用いて数値計算し、オーバーシュートと時定数との関係を表わす汎用図にまとめた。これから時定数飽和の効果が大きいことがわかった。また、対数出力計の時定数を飽和時定数で代表して記述すると便利であることを指摘した。2.5節においては、2.3節、2.4節の計算結果のうち、逆ペリオドのオーバーシュートについて実験的に検討を行った。計算結果と比較的よい一致が示された。最後に2.6節においては、起動事故（制御棒の連続引きぬき）に対するペリオドスクラムの有効性を確かめるために、ランプ状の反応度変化に対する対数出力ペリオド計の過渡応答を数値計算した。規格化パラメータを用いて一般的に計算を行うことができないので、いくつかの実際的な数値例について計算したところ、安全保護計装として十分に機能することがわかった。以上、本章における時定数設計の手順の確立と、この手順に適合した設計図表の提供とは対数出力ペリオド計の計装としての良さの評価を著しく簡略化した。得られた結果を利用して現在一般に使用されている対数出力ペリオド計を検討してみると、オフノルマルレベルをノルマルレベルに接近させることは十分可能であることがわかる。しかしながら、ペリオド計のオフノルマルレベルに対するゆらぎの振巾の割合が一定になるような設計を行った場合には、オフノルマルレベルのノルマルレベルに対する倍率が高いほどスクラム遅れが小さくなることがわかる。

第3章 非線形ペリオド計

対数出力ペリオド計の応答速度を速くすることと、ペリオド計のゆらぎを減少させることとは、それぞれ矛盾する要求である。そこで、従来からも非線形素子などを用いて、これら相矛盾する要求を最適な状態で妥協させる試みがいくつか発表されている。本章はそのような試みの一つである筆者の創案になる非線形ペリオド計について述べた。この方式はスクラムレベルがノルマルレベルの5～10倍という現在のペリオド計のフルスケールを認めた上で、ノルマルレベル付近のスケ-

ルを拡大して、オペレータの監視し易いペリオド計として考案されたものであるが、それが結果的には応答速度とゆらぎとの妥協の改善につながったものである。3.1節においては従来の改善策を概説し、それに対する批判を述べた。3.2節はペリオド計を非線形指示とすることの妥当性と具体的な方式、および、その静特性について述べた。こゝでは単なるスケール拡大の意味しかもっていない。3.3節は応答速度を計算している。ゆらぎとの妥協を検討するために、ペリオド計の時定数設計を三種類に分類して計算した。3.4節においては上に述べた三種類の非線形ペリオド計と従来のペリオド計について、同一スクラム遅れを与える時定数を具体的な数値例について比較検討した。その結果いずれの場合も、逆ペリオドで表わしたゆらぎを従来の方式の場合の $1/2$ 以下に改善することができることがわかった。

第4章 全半導体化対数出力ペリオド計の回路設計およびその特性

第2章において対数出力ペリオド計の系としての設計上の問題が解決したので、本章においては高信頼化のための半導体化対数出力ペリオド計を実現する具体的な諸問題を検討している。全半導体化するには電位計増巾器の半導体化と対数化回路の半導体化を実現しなければならない。4.1節は電位計増巾器の半導体化について述べた。MOSFETを用いた直結増巾方式について検討を行ったが、この場合の問題点はMOSFETの入力換算電圧温度係数であり、そのドレン電流による挙動は接合形FETの場合と同じ傾向を示す。しかしながら、実測してみると接触電位の温度係数がかなり大きく、定格ドレン電流の範囲内で零温度係数となる動作点が存在しない素子があることがわかった。さらに検討をしたところ、MOSFETのサブストレートに電流バイアスを与えることによって、この電圧温度係数が制御できることがわかった。最近でこそ同一ペレット上に作ったトウイン素子が市販されているが、この筆者の創案になる電流バイアス法は当時の温度係数軽減法として非常に有効であったと考えている。MOSFETとバイポーラトランジスタの組合せによって実現した全半導体化電位計増巾器は高い増巾度と広帯域とを同時に実現するという利点も持ち合せている。試作した増巾器は満足すべき特性を示した。4.2節は対数化回路の半導体化について述べた。当時のシリコン・ダイオードによったのでは必要な対数化範囲を得ることが困難であった。筆者はPn接合の特性が理想的な対数特性からずれる原因が拡散電流以外の電流によるものであることに着目して、低電流領域における電流増巾率の改善に努力が払われているプレーナトランジスタのエミッタベース接合を利用することを考え実測したところ、十分余裕のある対数化範囲を有していることがわかった。さらに対数化の温度特性を、飽和電流の温度特性を同種の接合との差動接続によって、対数化の勾配の温度特性を増巾器の増巾度に温度係数を持たせることによって補償するという二段構えで補償する方法を創案した。これによって得られた温度係数は、勾配については殆

んど零，平行移動分については $0.005 \text{ decade}/^{\circ}\text{C}$ で，これは補償を行なわない場合の約 $1/10$ である。3.3 節では上記電位計増巾器および対数化回路を用いた対数出力ペリオド計の定数を決定している。設計には第 2 章の結果が利用されている。さらに対数出力計の入力にケーブル容量が接続された場合の，対数出力ペリオド計の周波数特性について検討を行っている。MOSFET を用いた電位計増巾器の周波数帯域が比較的広いので，簡単な位相補償によって所期の特性が得られた。4.4 節は試作した全半導体化対数出力ペリオド計の特性の測定結果である。対数出力計の直線性，温度ドリフトともに $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において 0.1 decade 以下の精度である。従来の対数出力計の精度は良いものでも，計測範囲の中間領域で 0.15 decade ，両端においては 0.3 decade 程度であるから，この値は従来のものに比較してかなり改善された値であるといえる。また，すべての直流電流における微小振巾ステップ応答においてオーバーシユートは示されなかった。逆ペリオドのオーバーシユートは計算値とよく一致した。

第 5 章 結 論

以上述べたように，対数出力ペリオド計の時定数を安全保護計装の立場から総合的に設計することが可能になった。この設計法に従って時定数を設計し，さらに MOSFET 半導体化電位計増巾器および二段温度補償を有する半導体対数化回路を用いて全半導体化することによって，従来のものより特性，信頼性ともに優れた対数出力ペリオド計を実現することができた。その成果は日本原子力研究所の材料試験炉の計装に採用されている。

審査結果の要旨

原子炉の核計装は炉の起動と出力制御および安全保護のため信頼性の高いものであることが望まれる。原子炉の反応度計測系をなす対数出力ベリオド計は、約7デケードの対数化と微分演算機能の必要なことから、核計装中比較的信頼性が低く原子炉の誤スクラムの主要因ともなっている。本論文は対数出力ベリオド計の高信頼化に関する研究として、系構成論的設計法の検討と全半導体化の開発研究の成果をまとめたもので全編5章からなる。

第1章は総論で核計装の信頼性と原子炉の安全性との関係を述べ本研究の意義を明確にしている。

第2章では、対数出力ベリオド計の系設計に関して個々の特性のみでなく安全保護計装の立場から、時定数とゆらぎ、スクラム遅れおよびオーバーシュートとの関係を検討している。その結果、対数出力ベリオド計の時定数について、中性子検出の確率過程にもとづくベリオド計出力のゆらぎおよび指数関数的炉出力増加に対するベリオド計出力オーバーシュートとの関係を解析し、時定数設計を容易にする計算式および汎用図表を得ている。さらに、過渡応答についても解析を行ない、スクラム遅れによる原子炉出力のオーバーシュートと時定数の関係を評価する表およびベリオド計出力に現れるオーバーシュートと時定数の関係を評価する図を得ている。ベリオド計に現れるオーバーシュートが特定の規格化ベリオド値において最大値をとることが指摘された。これらの結果を用い計測範囲外から正常ベリオドの炉出力上昇によってベリオド計出力に現れるオーバーシュートのピーク値を許容値以下におさえるための回路を考案し、この設計に有用な図表を得た。

第3章では、ノルマルレベル付辺のスケールを拡大した非線形ベリオド計を提案し、その非線形指示の妥当性と設計および特性を検討し、これが結果的に対数出力計の応答速度を速くし且つゆらぎを減少させることになることを明らかにしている。これにより逆ベリオドで表わしたゆらぎが従来方式に比べて $1/2$ 以下に改善できることを示した。

第4章では、第2章における結果を用いて高信頼化のための全半導体化対数出力計を実現する具体的な諸問題を検討し、MOS型FETを用いた電位計増巾器と二段温度補償を有する半導体対数化回路を製作し、これらの諸特性の測定を行ない、従来のもより特性、信頼性ともに優れていることを示した。その成果は日本原子力研究所の材料試験炉の計装として採用されている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は従来明確でなかった対数出力ベリオド計の時定数の総合的な設計法を原子炉安全保護計装の立場から理論的実験的に解明し、その全半導体化を実現し、信頼性の向上をはかったもので、原子核工学および電子工学に寄与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。