電子式スリッピングクラッチの開発*

田 守 芳 勝** 原 田 和 好**
中 島 正***

Electronically Controlled Clutch

By Yoshikatsu Tamori, Kazuyoshi Harada, Tadashi Nakajima

The fishing boat industry has a chronic shortage in the labor force due to bad working conditions. Improvement of the working environment and labor saving by automation are needed.

“Electronically Controlled Clutch” was developed to meet the above demands. We have been researching the required performance and function needs based on the mechatronics previously developed at our company, and at the same time, improving our grasp of the market demand by going aboard different types of ships at different locations.

In this article, we will introduce the summary of a case study on mechatronics technology as applied to the propeller propulsion system.

1. ま え が き

漁船市場は、労働環境が悪いことなどから労働力不足が慢性的であり、作業環境の改善、運航や漁労の自動化による省力化及び操船性の向上が求められている。

「電子式スリッピングクラッチ」は、それらの改善を狙いとしており、その開発にあたり過去に当社で開発したメカトロニクス技術を基に、市場の要望を把握すると共に、各地で様々な船に乗船し要求性能及び機能について調査してきた。

本稿においては、メカトロニクス技術をプロペラ推進システムに応用した事例として、その概要を紹介する。

2. ね ら い

2.1 高速船の微速航行 船用減速逆転機は一對の常時噛合歯車による減速方式であり、動力の伝達は、油圧クラッチのON/OFFで行われる。

通常「プロペラ回転数」は、機関回転数と減速比により決定されるが、「かつお船」などの高速船は、近年の機関の高出力化によって、最高船速が速くなると共に、最低船速も速くなる傾向にあり、接岸や漁労時などの操船が難しくなる。

最適船速を確保するため、アイドル回転数以下の「プロペラ微速回転」が必要である。

2.2 1つの主機関でプロペラと発電機2つの作業機を駆動 「まき網灯船」には機関前部に集魚灯用の発電機が装備されており、作業時にはこの発電機を運転するため機関回転数を1000～1200rpmとしており、同時にプロペラ回転数100rpmおよそ1ノットの微速でまき網本船が、まきとり易い場所まで魚を移動させる必要がある。

従来は、クラッチのON/OFFを繰り返しながら微速船速を制御したり、機械式のスリップ装置を使用していたが、クラッチ嵌入時に集魚灯が一瞬暗く

*原稿受付 平成9年2月3日
第57回秋季学術講演(平成8年10月16日)

**正会員 ヤンマーディーゼル株式会社(京都府乙訓郡大山崎町)

***ヤンマーディーゼル株式会社(京都府乙訓郡大山崎町)

(1) 高性能スリップ

(2) クイック・ショックレス 嵌入

(3) フェイルセーフ

図1 機能概要

なり魚が離散したり、船速が不安定となり漁獲に支障をきたすこと等から安定したプロペラ回転数の制御が必要である。

2.3 負荷変化に対し安定したプロペラ回転数 カニ・エビ漁、ホタルイカ漁などの軽負荷底曳用途では、底曳開始から徐々に網の中のカニやエビ、ホタルイカの量が増えてきても「船速や曳力が安定する」必要がある。

2.4 微速航行とクイック・ショックレス 嵌入 港内など特に狭い場所での作業船では、微速航行中に前・後進を素早く繰り返し船体の向きを変えるため、ショックを抑えた素早い嵌入が必要である。

いずれも従来の機械式装置では、コントロールできない微妙な制御であり、これらの要求性能に応えるためクラッチの作動油圧をマイクロコンピュータによりコントロールし、微妙なスリップ制御を行い任意のプロペラ回転数を実現させることをねらいとした。

加えて、トラブル発生時でも通常の操作には全く支障がないシステムとすることを考慮した。

図2 システム図

図3 コントローラ

3. 構造

図2に示すようにセンシング対象は、入力回転数出力回転数及びクラッチ前・後進切換レバー位置である。アクチュエータには、クラッチの作動油圧を制御する「低速弁」、パイロット油圧によって低速弁を制御する「比例電磁弁」、異常時やスリップ制御をしない場合、また摩擦板の焼付き防止のため、機関回転数がある回転以上になるとクラッチを直結させる「直結電磁弁」を装備している。

「プロペラ回転数設定器」の操作に対応し「コントローラ」で制御する。回転数は、「プロペラ回転計」に表示される。なお、「出力回転数検出用センサ」は2個配置し回転方向の検出を行っている。

図3に示すコントローラは、8ビットワンチップマイクロコンピュータの搭載により高度な制御を可能とした。

また、制御パターンを変更する場合や故障箇所がすぐに判るようモニタ機能を内蔵している。

図4 マサツ板 $\mu - v$ カーブ

図5 マサツ板 吸収エネルギー限界

4. スリッピング制御

4.1 スリッピング制御 クラッチに使用されている摩擦板の摩擦係数には図4に示すような特性がある。

摩擦板の種類により異なるが、回転速度が小さくなると摩擦係数は急激に変化する。

マグロ延縄船では、摩擦板部の回転速度は400rpm程度で使用するため、プロペラ回転数のわずかな変化に対して摩擦係数が大きく変化する。

まき網灯船では1000～1200rpm程度で使用するので回転速度に対する摩擦係数の変化は少ない。しかし長時間使用するため、潤滑油温度の上昇により摩擦係数が変化する。

従来の機械式装置では、油圧制御であるためプロペラの回転数が不安定となるが、電子式の場合は、直接プロペラ回転数をフィードバックしてクラッチ作動油圧を適切に調整し、安定した回転数を実現することができる。

クラッチの損失は、スリッピング時の機関馬力とプロペラ馬力の差であり下記のとおり求める。

ここで

スリッピング時 機関回転数: N_e プロペラ回転数: N_p (スリッピングのない場合: N_{p0})

スリッピング時 機関馬力: H_e プロペラ馬力: H_p (スリッピングのない場合: H_{p0})

定格時 機関回転数: N 機関馬力: H とする。

プロペラにかかる負荷を船用3乗負荷とすると

$$H_{p0}/H_p = (N_{p0}/N_p)^3$$

プロペラ馬力 H_p は

$$H_p = H_{p0} \times (N_p/N_{p0})^3$$

クラッチの伝達トルク T は

$$T = 716.2 \times H_p / N_p \times 1/i \quad \dots \textcircled{1}$$

$$T = 716.2 \times H_e / N_e \quad \dots \textcircled{2}$$

機関馬力 H_e は $\textcircled{1}$ 、 $\textcircled{2}$ より

$$H_e = H_p \times N_e / N_p \times 1/i$$

損失 H_{loss} は

$$H_{loss} = H_e - H_p$$

$$= H_p \times N_e / N_p \times 1/i - H_{p0} \times (N_p/N_{p0})^3$$

$$= H_{p0} \times N_p^2 / N_{p0}^3 \times (N_e/i - N_p) \quad \dots \textcircled{3}$$

$$d(H_{loss})/d(N_p) = H_{p0}/N_{p0}^3 \times (2N_p \times (N_e/i) - 3N_p^2)$$

したがって、 H_{loss} の最大値は $N_p = 2/3 \times N_e/i$ の時であり、 $\textcircled{3}$ 式に代入し

$$H_{loss} = 4/27 \times H_{p0} \quad \dots \textcircled{4}$$

又、 $H_{p0} = H_e \times (N_e/N)^3$

$\textcircled{4}$ 式に代入し、 H_{loss} の最大値は

$$H_{loss} = 4/27 \times H \times (N_e/N)^3 \quad \text{となる}$$

損失が全て熱に変換されると仮定し、ヒートバランスの計算を行うと

$$H_o / (K \times F) = (t_1 + t_2) / \ln((t_e - t_2)/(t_e - t_1))$$

となり、本式で求められた潤滑油の入口温度: t_e が、基準値を越えないよう制御定数を決定する。

ここで

H_o : クラッチ回転部からの発熱量 (スリッピングによる損失)

K : 熱貫流率

F : 潤滑油クーラ冷却面積

t_1 : 冷却水の温度上昇 t_{a1} : 冷却水の出口温度 t_{e1} : 冷却水の入口温度

t_2 : 潤滑油の温度上昇 t_{a2} : 潤滑油の出口温度 t_{e2} : 潤滑油の入口温度

図6 クラッチ部の損失とヒートバランスの計算

図5は摩擦板の焼付に対する限界を示したものであり、連続スリッピング運転においては、破線より下が「安全域」となる。

単位吸収工率 ε は、次の式により求められスリッピング時の最大油圧、スリッピング可能な機関回転数の上限が決定される。

$$\varepsilon = \mu \times P \times v \quad (N \cdot m/cm^2/s)$$

μ : 摩擦係数

P : 摩擦板面圧 (N/cm^2)

v : 周速 (m/s)

安全性のため、最大油圧を制限すると共に機関回転数がスリッピング禁止域迄上昇した場合、クラッチを直結する「直結弁」を装備している。

また、スリッピング運転時のクラッチ部の損失は潤滑油温度の上昇という形で現れるため、潤滑油冷却器のヒートバランスを図6のとおり計算する。

すなわち、スリッピング装置の付いたクラッチと付いていないクラッチとでは、潤滑油冷却器の冷却能力を変更する必要がある。

図7はクラッチのスリッピング運転可能な範囲を示す。

図7 用途別スリップ制御回転域

図8 スリップ制御 ブロック線図

スリップの上限回転数、プロペラ回転数設定値の上限及び下限回転数、機関回転数の上限及びアイドル回転数で囲まれた範囲が運転可能である。

図8はスリップ時のブロック図を示したものである。プロペラ回転数設定器により「目標プロペラ回転数」が設定されると、コントローラで比例電磁弁への電流値を算出しクラッチ作動油圧を調整する。これによりスリップ状態が決定され、プロペラ回転数が変化する。その回転数をフィードバックし「目標プロペラ回転数」になるよう制御を繰り返す。

4.2 クイック・ショックレス嵌入制御

クラッチの嵌入時にショックが発生すると、集魚灯等で集めた魚が驚いて逃げてしまったり、乗員に不快感を与える等ショックレスの要求がますます厳しくなっている。船に対しても、自動車の発進時と同様の感覚が求められている。静かに嵌入しても時間がかかり過ぎると、クラッシュアスターン（前進から後進への嵌入）時に反応が遅れる等操作性が悪くなる。したがって、クラッチ嵌入時には「ショックを抑えて、素早く嵌入」する必要がある。

クラッチ嵌入時の作動油の制御パターンを図9に示す。

図9 嵌入時の制御パターン

図10 フェイルセーフ ブロック線図

- ①嵌入スイッチがONする。
- ②P 1の作動油圧力でT 1秒間保持する。
(プロペラの回り始めを素早くする)
- ③P 2まで圧力を下げる。
(クラッチ嵌入時のショックを緩和する)
- ④P 2からP 3まで作動油圧力を上昇させる。

ここで、スリップ時のプロペラ回転数の立ち上がりがオーバーシュートしているが、これは発進時の船体抵抗に対し、素早く応答するための制御である。

4.3 フェイルセーフ制御 図10のブロック図に示すように、コントローラ等に下記のようなトラブル、

- ①システムへの電源の供給が遮断した
 - ②センサが異常値を示した
 - ③機関回転数がスリップ禁止域迄上昇した
- 等が生じて、自動的に直結電磁弁がOFF（通電

されない) され、低速弁のバネを押しクラッチ作動油は最大油圧となり、スリップ運転を中止し、通常の航行には支障がないようにフェイルセーフ機能を有している。

図11に示す油回路図において、破線内が従来のク

図11 油回路図

ラッチに追加した電子式スリッピング装置である。

4.4 モニタおよび制御定数変更機能

コントローラにはチャンネル毎にデータの形式でモニタ表示する機能を有している。

図12に示すモニタ画面には、機関回転数、プロペラ回転数、プロペラ回転数設定値、嵌入信号、比例電磁弁の出力等、センサ及びアクチュエータの状態が表示される。試運転時のチェックやトラブルが発生した場合に、入出力信号をモニタで確認しながら対応できるため作業の容易化が計れる。

また、コントローラには図13に示すように「EE PROM」を内蔵し、船型やユーザ毎の多様な要求

図12 モニタ画面 概略図

図13 コントローラ内部ブロック図

図14 19トン まき網灯船

船名：第10事代丸 船籍：隠岐島 西郷
船長：24.35m 船幅：4.28m 深さ：1.85

図15 スリップ特性

に対応するため、制御定数が変更できる機能を装備している。

4.5 エラーレコーダ機能 コントローラには、異常が発生した場合にモニタ表示すると共に、異常箇所が正常に復帰した場合でも発生した異常内容を記憶する機能を有している。

また、異常内容はリセット操作されるまで電源を遮断しても記憶されたままである。

現地においてトラブルが発生した場合、再現性のある異常であればすぐに対応可能であるが、再現性のない異常（電気配線の接触不良等）にたいしては判断しにくいものである。そのためエラーレコーダ機能により、過去に発生した異常内容がその場で確認できるため、現地においてのメンテナンスが容易となる。

5. 性能

本装置を搭載した19トンまき網灯船（図14）における性能を示す。

図16 スリップ時の応答性

図17 スリップ時の安定性

5.1 スリップ特性 「プロペラ回転数設定ダイヤル値」と「プロペラ回転数」および「クラッチ作動油圧」の関係を図15に示す。

ダイヤル値の増加，減少共に「プロペラ回転数」は直線的に制御され安定しており，5 rpmの分解能で設定が可能である。また，9目盛以上は直結となるよう設定されている。

5.2 スリップ時の応答性 機関回転数800 rpm時に，プロペラ回転数設定器により，プロペラ回転数を0から110rpmに設定し放置した場合の「比例電磁弁の制御電流」，「プロペラ回転数」及び「クラッチ作動油圧」の動きを図16に示し，順を追って説明する。

- ①プロペラ回転数を0から110rpmに設定する。
- ②比例電磁弁の電流値を立ち上げる。
- ③クラッチ作動油圧が上昇する。
- ④プロペラ回転数が立ち上がる。
- ⑤プロペラ回転数が設定値より速くなると電流値を下げ
遅くなると電流値を上げ
クラッチ作動油圧をコントロールする。

⑥プロペラ回転数が設定値で安定する。

従来に比べ早い立ち上がりであり、通常嵌入時に比べても、そんなしくない立ち上がりである。

5.3 プロペラ回転数の安定性 プロペラ回転数を140rpmに設定し負荷変動を与えた時の「プロペラ回転数の安定性」を図17に示し、順を追って説明する。

- ①負荷が変動する。
- ②負荷が大きくなると、作動油圧を高くする。
負荷が小さくなると、作動油圧を低くする。
- ③プロペラ回転数は安定する。

6. ま と め

「電子式スリッピングクラッチ」は、600～1500 kWまでの機関とのセットで、現在稼働中であり以下の評価を得ることができた。

- ①安定したプロペラ微速回転数が容易に制御可能となり、漁労時や航行時の自動化により、省力化が計れた。
 - ②微妙なスリップ操作が可能となり、操船性が向上した。
 - ③クイック・ショックレス嵌入により、魚が驚いて逃げることがなくなる等、作業環境の改善を計ることができた。
- などである。

なお、システムの信頼性に関しては、JISの環境試験をクリアーしている。

今後共、本装置を様々な用途に適合するための、性能向上及び信頼性の向上に努める所存である。

参 考 文 献

- 1) 田守ほか、内燃機関、26-333 (1987-7), P 262
- 2) 小林ほか、漁船機関、715 (1986-5), P 18
- 3) 田守ほか、舶機誌、第39回学術講演会、P 71

~~~~~ メ ャ ッ セ ー ジ ~~~~~

田守芳勝

原田和好

中島 正

我が社においては、小型船舶を含む舶用機器をはじめとして、建設・土木・農業機械及び施設、各種環境機器などの商品を生産販売している。これらの商品は、省エネ・省力・省人・低公害化など「人にやさしく・地球にやさしく」をモットーにメカトロニクス化を進めている。今回紹介した「電子式スリッピングクラッチ」は、舶用分野におけるメカトロニクス商品の一例である。

自動車には及ばないが農業機械の分野では随分とメカトロ化が進んでおり、大型のコンバインでは一台で5～7個のコンピュータコントローラを持つものが現れている。これらと比較すると船舶におけるメカトロニクス化は非常に遅れている。

安全面や少量生産などメカトロニクス化に不利な面も多いが、企業間の垣根を越えた開発と各技術者が情熱と挑戦意欲をもって、舶用のメカトロニクス化を推進していくことが必要と考える。