(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

交流電動機新速度制御方式の船用 ウインチにおける実際適用

正員 柴 田 福 夫*

Practical Application of Speed
Control Method of A.C. Motors to Ship Winches
Fukuo Shibata, *Member*

Summary

The reasons why we want to use pole-change type motors for ship winches are not only because of (1) their cheaper cost, but also (2) easy maintenance of induction motors depending on that they have no commutators. But, unfortunately we have practically had many cases of burning trouble of pole-change winch motors. This is, the problem which requires fundamental study.

I should like to propose an idea to apply the Speed Control Method of my new invention to Ship Winches. And as I have been able to get the test result of the practical application of my invention to Dredger Winches, I should like to inform the test report, together with its theory. In the theory and the practice, we use wound rotor type induction motors for Ship Winches.

1 緒 言

船舶の交流化が叫ばれてからすでに 10 年、船舶は現在交流化されたと云つて良い。しかしこの間常に問題となつていたのはウインチ、ウインドラス等の甲板機械における交流化であり、この問題は船の交流化が完了したと考えられる現在においてすら解決されていない大きい一つの点である。

籠型誘導電動機を用い、これを極数変換(ポールチェインジ)してウインチの速度制御をすると云う試みはかなり古い歴史を持つているが、実際使用はここ 5, 6 年位の間に多くなつた。船用ウインチにポールチェインジを用いようとする理由は(1)その価格の安いことだけではなく(2)誘導電動機の堅牢性と整流子がないことによる保守の簡易さにある。だが事志と反し、実状においてはポールチェインジモーターの回転子焼損とか回転子線輪脱出とか云つた事故は後を絶たない。

このような現象はなぜ起こるのか。基準の規格規則が悪いのか。個々の設計や工作に問題があるのか。事實はそうでないようである。上述のごとくポールチェインジウインチの歴史はかなり古い。その長い期間には詳細な設計上の問題や工作は専門的にかなりの検討が加えられている筈である。とすればわれわれは次のような根本的な問題として結論せざるを得ないのではなからうか。すなわち籠型誘導電動機の起動電流が定格電流の 6 倍と云う桁違いの大きさであり、これは電動機の大きさいかにによらず同じことで、速度変化する度にこの定格の 6 倍電流が流れるものでそれはウインチ定格時の 36 倍の発熱源を意味し、また船内発電機の容量増大、付属器具のコンタクター容量増しを考えねばならず、インテングや速度変換をその主要動作とするウインチに対しポールチェインジの電動機を用いること自体根本的観点から非常に無理で、この種ウインチの将来が見えているように思われる。

以上のようなポールチェインジに対しワードレオナード方式はかなりの高価となるをまぬがれ得ないし、またそれ以上に水密構造のウインチ中に整流子を持つ大型直流機が含まれていることは、その保守の点から云つて好ましいことではない。ではウインチの交流化について試みられて来たこのような努力は結果において何もたらし得なかつたかと云うとそうではない。「船用ウインチは直流機による直捲特性でなければならぬ」とした過去

原稿受付 昭和 36 年 6 月 20 日

* 川崎重工株式会社造船設計部

の金科玉条的考え方を実際経験から訂正せしめたのは当然のことながら、船用ウインチの進展上重要なこと柄であつた。このような状況にあつて船用ウインチに対し筆者考案の交流機速度制御 SHIBATA REDUCER (商品名 REVATRANS) を適用せしめることは極めて妥当な考え方である。その基本的な考え方としては、(1) 起動電流を定格電流程度以上に大きくしないからインテングや速度変化を数百回繰り返して行なつても良い。(2) ウインチモーターは簡単な巻線型誘導電動機のみとし、整流子点検の要なく、保守は容易である。(3) ウインチの付属器具は小型可変比変圧器とセレン整流器のみで、これをマストハウスに入れることは簡単である。(4) 16 台とか 18 台とか云つた船全体のウインチに対し、1 台の小型電動発電機 (全ウインチ定格総合容量の 30% 以下) を共用とし、これを機関室内あるいはその他適当な場所におく。この小型電動発電機はウインドラスにも共用できること勿論である。(5) 速度制御は何段階にも取れるが、まず最も妥当な 4 段階とし、400 回転、800 回転、1200 回転、1500 回転程度とし、大略分捲特性的とし、最高速ノッチは幾分直捲の特性とする。(6) 以上のようにすると価格安く、堅牢で保守容易、且つ特性も良いとすべての点で秀れた船用交流ウインチとなる。

筆者は以上の考え方を基礎に REVATRANS 方式を船用ウインチに適用すべき理論を展開し、且つ今回その第 1 号機として新方式をドレッジャーのスイングウインチに実用化し得たので、これを紹介し、今後の広い御利用のための御参考としたいのである。なを本方式は筆者の交流電機船舶推進方式を理論的且つ实际的に発展せしめたものであり、詳細点では両者間にかんがりの相異点があるが、このスイングウインチにおける第 1 号機の製作は今後船舶の各種動力源として用いられるのであろう REVATRANS 一般の一発展段階としてその意義は深い。

2 基本理論

ウインチに要求される電動機特性は当然ほぼ定トルク特性でなければならない。過去の直流ウインチで直捲特性的な複捲電動機が良いとされたのは単にその起動時や速度変換時の加速トルクのためであつて、ポールチェンジウインチの実績からも良く判るようにその定常時の必要特性は原則的に定トルク特性である。

いま REVATRANS を甲板補機に用いようとするときその基本的な形式としては二種類に分けられる。それは捲きもどし時に回生制動、つまり電源へ電力を返換しつつ速度制御をしなければならない場合と、その必要がない場合とがある。“REV”を甲板補機に使用する場合の型としては第 1 図に示すように巻線型主誘導電動機の二次出力端子から出る電力を可変比変圧器と金属整流器を通して主電動機と機械的に結合する補助直流機に供給

第 1 図 Revatrans (Shibata Reducer A 型)

第 2 図 Revatrans (Shibata Reducer B 型)

する方式と第 2 図のように電源へ帰還する方式とがあるが、第 1 図方式は回生制動を行なおうとするときには別個の装置を必要とするので、回生制動の必要の場合には専ら第 2 図方式が用いられる。且つ第 1 図の方式にあつては補助直流機が主電動機と機械的に結合されているため、直流機の回転数が主電動機の回転低下と同時に低下して行き、補助直流機自体定出力特性でなく定トルク特性的にしか使い得ないので主電動機と補助直流機を合せた総合トルク特性も余り大きいものとはなり得ず、まだ主電動機が低回転のものでは補助直流機の寸法も少し大きくなるので特別なトルク特性を要求されない限りは第 2 図方式の方が実用であると云い得る。第 2 図の場合には補助電動発電機 DM-IG が主電動機とは独立に常に一定回転で運転され、その寸法は小さくし得、且つ可変比変圧器の作用により補助機自体は定出力的に作動するように結合される。

いま簡単に第 1 図および第 2 図方式の回転数—トルク特性を図式化するために巻線型誘導電動機の基本式を示す。

$$P_1 : P_2 : P_3 = 1 : S : 1 - S \quad (1)$$

ただし P_1 ; 二次入力

P_2 ; 二次端子より出る二次電気出力+誘導電動

機の二次銅損+誘導電動機の二次鉄損

P_3 ; 機械損失を含めた機械動力

$$(1) \text{ 式から} \quad P_2 + P_3 = P_2 / S \quad (2)$$

しかるに第1図のごとき方式にあつて以下損失を無視すれば、その機械から出るトルク τ は(2)より

$$\tau = k_1 \frac{P_2 + P_3}{1 - S} = k_1 \frac{P_2}{(1 - S) \cdot S} \quad (3)$$

いま補助直流機の出力をある回転数 $1 - S_1$ で ρ とするとこの補助直流機の電機子定格電流をいずれの回転においても通じ得ると仮定した場合、 $1 - S_1$ 以下の任意回転において補助直流機が出し得る出力 P_2 は次のようになる。

$$P_2 = \rho \frac{1 - S}{1 - S_1} \quad (4)$$

(4) を (3) に代入すると

$$\tau = k_1 \frac{\rho}{(1 - S_1) S} \quad (5)$$

また $1 - S_1$ 以上の回転数に対しては

$$\tau = k_2 \frac{P_1}{1 - S} \quad (6)$$

しかるに(1)式より $P_1 = P_2 / S$ で且つ S_1 のとき $P_2 = \rho$ ゆえこれを(6)に代入

$$\tau = k_2 \frac{\rho / S_1}{1 - S} = k_2 \frac{\rho}{S_1 (1 - S)} \quad (7)$$

(5) と (7) は $S = S_1$ において等しいから $k_1 = k_2 = k$ を得る。よつて $S = S_1$ よりも低回転のときは

$$\tau = k \frac{\rho}{(1 - S_1) S} \quad (5)'$$

$S = S_1$ よりも高回転のときは

$$\tau = k \frac{\rho}{S_1 (1 - S)} \quad (7)'$$

これを図式化すると第3図のごとくなる。第3図においては $S = 0.3$ において補助直流機の容量が主電動機の30%の場合を示し、その際の回転数対トルク曲線は CMN となる。 AB は補助直流機の出力、 PQ は任意の点における

第3図 “REV” A型 (“S,,RED”) のトルク対回転数特性

第4図 “REV” A型 (“S,,RED”) のトルク対回転数特性

その出力, GH は PQ に等しくつてある。△ ABC , △ GHE , △ KLF 等の縦軸はすべてその回転数における補助直流機出力, AC , GE , KF 等は各変圧器タップにおいて直流機励磁を調整して得られる総合出力を示す。第4図においては第3図の曲線を各種とつて示した。すなわち誘導電動機容量が滑り 0.5 において主電動機の 50% の場合 RTV となり, 補助直流機容量が滑り $S=0.45$ において主電動機の 45% の場合 RUX , また $S=0.4$ において同じく 40% の場合 RWY のと云うように順次各種の特性を示す。次に第2図の如き方式にあつては以下諸損失を無視し,

$$\tau = k_3 \frac{P_3}{1-S} = k_3 \frac{P_2}{S} \quad (8)$$

補助直流機容量 P_2 が ρ であつて, これが主電動機の S_1 倍のとき, 滑り S_1 のときよりも低回転に対しては

$$\tau = k_3 \frac{\rho}{S} \quad (9)$$

である。滑り S_1 のときよりも高回転のときは一定トルクで

$$\tau = k_3 \frac{\rho}{S_1} \quad (10)$$

これ等関係を図示したのが第5図である。この図においては補助電動機容量が主電動機の 50%, 45%, 40% ... 10% の場合を示している。以上の特性はすべて各種損失を無視した理想特性である。

第5図 “REV” B 型 (“S, RED”) のトルク対面回転数特性

第6図 ウインチに用いられる “REV” (“S, RED”)

つぎに第2図の方式において補助直流電動機 DM を他励式または僅かの直巻線輪と他励線輪との結合による複巻方式とする。これらの場合, 他励巻線による励磁を最大に設定しておき変更しない。主電動機は速度調整は専ら可変比変圧器 VT だけで実施する。船舶電気推進で示した速度制御と異なる重要点はこの点であるが, 滑り S が補助直流電動機容量対主電動機容量の比よりも小さい場合にも今回ウインチに適用する場合は直流励磁を変更せず, 可変比変圧器 VT によつて制御するのであり, そこに素晴らしい発展の基礎がある。すなわちかような場合, 大切な点は (1) 直流電動機 DM の電圧は一定不変ゆえ, 複数個の主誘導電動機 IM に対し単一の DM , 単一の IG (誘導発電機) すなわち単一の電動発電機で全誘導電動機群 IM の速度を各個に自由に同時異速度に調整し得ることと (2) DM は常にその最大定格容量で使用され, 速度速く滑りの小さい範囲では直流電動機は定格電流以下で使うようになることである。

第6図にはそのような回路を示した。各電動機には可変比変圧器とセレン整流器とが装備されている。直流電動機 DM は前述のごとく他励分巻とするかあるいは少量の直巻分を含む複巻とするのはその電流の大小によつて電圧が大きく変動して他のウインチ速度に影響を与えないようにするためだが, 電圧変動瞬時 20~25%, 整定 6% 程度位であれば問題ないと考えられる。第6図では直流電動機 DM は常に最大定格電圧を示し, 比較的高回転の場合には可変比変圧器の変圧比 $u=w_1/w_2$ は低く保ち逆に低回転の場合には u は高い値とする。このようにすると主電動機の回転数が低いとき, 主電動機二次巻線回路に要求される電流 I_2 を出すために直流機側ではほぼ $u I_2$ を出さねばならないから回転数の低い主電動機が数多く重なれば直流機にとっては過電流となるかも知れない。このように考えるのは妥当なことであるが, ウインチの回転数が高くなつて定格回転に近づいていつた場合 u が小さい値となるからその際主電動機二次巻線回路に要求される電流 I_2 を出すための直流機側が負うべき電流 $u I_2$ は定格電流以下

の低い値に保つことができるのである。ウインチ本来の運転状況を考えると起動時には回転数を低くそして徐々に最大回転に達せしめるのであるから、その直流機の需要状況から考え、最初一時的に過電流をかけて、あとで低電流に保ち、一昇降過程を平均すれば直流機の温度上昇はこの電流の平均によつて定格温度上昇以下に保つことができ、従つて補助直流機を小型に保ちながら第6図方式では常に一定トルク特性を保持し得るのである。

以上のことをさらに詳述すると次のごとくである。すなわち第2図の場合、主誘導電動機の容量に対して補助直流電動機の容量割合が大きい程度トルク特性範囲が大きい。これは第5図の特性で判るように補助電動機出力が主電動機出力に対し50%のときはABCの特性、45%の時はADE、40%のときはAFGの特性と云う具合となる。第5図の特性はあくまでも補助直流機の容量をこの電動機が定格電流以上通電できないとして押えて造られた曲線であり、実際にウインチに利用する場合直流機の短時間過電流容量を利用すればABCやADEの特性はABHの特性となり得るのであるし、また主誘導機が複数個で補助直流電動発電機が単一専用の場合は主誘導機の単数容量よりも補助直流電動発電機容量が大きくなるからあえて直流電動機の過電流容量に頼らずとも主電動機の低回転運転をしている個数が少なければ当然ABHの特性をとり得るのである。つまり“REV”の真髄はの場合次のような点にあるのである。すなわち直流機の設計、工作上の容量を考える場合その磁気回路は定格電圧においてかなりの飽和点を使用しているためその電圧を定格以上2倍とか云つた程度に上げることとは不可能で、せいぜい15%程度であるのに対し電流の方は短時間であれば2倍、3倍等の過電流を通電せしめることは不可能ではない。この直流機の性質と可変比変圧器の有する電力マッチング作用を利用して補助電動機の有する全出力を主電動機に対して有効に用いるのである。

最後に回生制動についてであるが、主誘導電動機の一次三端子のうち二端子を結び、これを正極とし他の一端子を負極とすると直流を印加すると主誘導電動機には固定磁界を生じ、その固定磁界中を回転する二次回転子にはその出力端子に交流電圧を発生する。その値は直流励磁の値によつて種々の値を取り得るが、同時にこの変圧器の変圧比を調整することによつて二次回転子出力電圧電流と補助直流機電圧電流との間のマッチングをなし、これによつて秀れた回生制動を行ない得るのである。ウインチ巻き上げ時、主電動機出力が30馬力必要とすると巻き降り回生制動時にはウインチギヤや滑車等の諸損失のため、必要電動機は例えば18馬力程度で良く、従つて回生制動に対する補助直流機の必要容量は小容量で良いと考えられるのである。

3 “S” REDUCER (REVATRANS) の特長

巻線型誘導電動機の二次出力端子回路に挿入された可変比変圧器と金属整流器の巧みなコンビによつて主電動機と補助直流機間の電力マッチングをし、広範囲速度制御することを特長とする本方式の利点を概略的に述べておく。

(a) 基本的な考え方—主誘導電動機と補助直流機間の電圧だけではなく電流も併せてマッチングし速度制御をするからその両者の間に可変比変圧器と金属整流器を挿入することは極めて合理的で、次の利点をもつ。

(b) 簡単な変圧器の使用—巻線型電動機の二次回路に挿入された可変比変圧器の二次回路、つまり直流機回路はこの系統の主回路ではなく、補助回路ゆえ、電力的に小電力すなわち、誘導電動機の $P_1 : P_2 : P_3$ の P_2 分〔前記(1)式〕であるから開閉しやすく従つて最も簡単安価な変圧器とコンタクターを用い得る。

(c) 回転機の設計、工作上—主電動機と補助直流機を別個独立的に設計製作しても変圧器一つの調整で両者を能率良く結合できるから、電動機は安価な標準品であつても良い。

(d) 可変比変圧器容量—主電動機二次側挿入変圧器の大きさは理論上

$$\phi \times AT = \frac{E_2 \cdot I_2}{K \cdot f_1} < \frac{E_1 \cdot I_1}{K \cdot f_1} \quad (11)$$

ただし ϕ は変圧器磁束、 AT はそのアンペアターン、 E_2 は主電動機静止二次誘起電圧、 I_2 は二次定格電流、 f_1 は主電動機一次側周波数、 E_1 および I_1 は一次電圧および電流ゆえ、大きい励磁電流のため $E_1 I_1$ に対し $E_2 I_2$ は30%程度も小さい。これは二次挿入変圧器容量が一次側対応の変圧器より30%程度も小さいことを示すものである。

(e) 効 率—主電動機一次電圧を一定に保つているから主電動機中の最大損失たる銅損を少なくし、また変圧器の大きい損失たる鉄損を少なくし、総合的効率是非常に高い。

(f) 力 率—二次回路に挿入された変圧器の作用により、変圧器二次インピーダンスを変圧器一次に換算する際、変圧比 u の二乗を乗ずる。このようにすると可変比変圧器の二次側にある直流機電圧や金属整流器抵抗な

どの純抵抗分が大きくクロズアップされ、二次電流 I_2 分はほとんど E_2 と同相となり、そのため系統全体の力率を改善する。

4 実際試験結果

ドレッジのスイングウインチに対して実施された本方式の試験結果を示し、その例から船用ウインチ般への応用可能性を明らかにしたい。本例は第2図示の方式であり、その速度制御はマスターコントローラーにより

第7図 総合装置

変圧器タップと直流機電圧を交互に変更して行なつた。第7図はその総合装置を示し、第8図はその個々の機器要目を示す。第9図はコントローラー各ノッチの直流機電圧、変圧器タップ、および主誘導電動機回転数を示す。以上の試験結果はこの系統の理論数式たる次式から近似的に計算できる。

$$n_1 = \left\{ 1 - (0.753 E_m + 2a \Delta E) \frac{u_1}{E_2} \right\} n_0 \quad (11)$$

ただし n_0 ; 主電動機同期速度, n_1 ; 主電動機速度, E_m ; 直流機電圧, ΔE ; 整流器電圧降下, a ; 整流器直列枚数, u_1 ; 可変比変圧器の変圧比, E_2 ; 主誘導機静止二次誘起電圧

1. 捲線型誘導電動機	容量	一次電圧	静止二次誘起電圧
	125馬力	440V	340V
2. 可変比変圧器	一次相電圧タップ	290V / 260V	
	二次相電圧タップ	147V, 128V, 80V	
	於 60Hz	116V, 80V	
3. 金属整流器	三相全波	逆耐電圧	相間150V
		直流側電流	200A
4. 電動発電機	直流機	110V, 200A	22KW
	巻型誘導発電機	440V	20KW

第8図 機器要目

コントローラ ノッチ	直流機 電圧	変圧比 タップ	主誘導機 回転数 rpm
1	88V	290/80	530
2	75V	290/80	690
3	88V	290/116	909
4	75V	290/116	1020
5	88V	290/147	1105
6	75V	290/147	1190
7	29V	290/147	1505

第9図 特性表

以上の試験結果より直流機電圧を一定のまま、変圧器の変圧比を変えるだけで主電動機を速度を大幅に変更せしめ得ることが判り、本論文の基本的な考え方の正当性を立証し得た。なお本試験において回転変化時に現われる過渡的な直流機電流、直流機電圧の変化をオツシログラフでとり、これを示したのが第10図である。これら過渡時には主電動機一次電流は定格電流以下の極めて少ない電流が流れた。以上を総合して極めて良好な試験結果であつたと云い得る。

第10図 過渡現象

5 結 言

以上船用甲板補機に対し筆者の速度制御方式を適用する理論の概要を示し、さらにこれを実際的に適用したドレッジ・スイグウインチによつて本理論の実用化の裏づけを行ない、今後の広範囲利用の第一歩たらしめた。船舶荷役の単一化が現在問題化して来たが、本方式がそのような問題に対して最も秀れた方法として貢献できるであろうことを信ずるものである。