

日立製作所創業100周年記念シリーズ

開拓者たちの系譜

6

創業精神を受け継ぐモータ・インバータ技術

日立における産業機器技術の歩み

株式会社日立産機システム QAセンタ センタ長

南藤 謙二

はじめに

日立製作所は2010年、創業100周年を迎える。

日立製作所の創業製品は5馬力(3.7 kW)の誘導電動機で、1910年に製造されている。その現物が、茨城県の日立製作所日立事業所の創業小屋と、伝統の誘導電動機を生産し続けている千葉県株式会社日立産機システム習志野事業所(元日立製作所習志野工場)展示室に飾ってある。満98歳を迎える今日でも、電気を入れると立派に動く。このモータの回転音を聞くと国産のモータをつくりたいという創業者達の声が聞こえてくる気がする。産業機器はこのモータを中心に発展してきた。

具体的な産業機器製品の名前を挙げれば、モータ、ポンプ、送風機、空気圧縮機、変圧器、開閉器、インバータ、クレーン機器、空調機器、業務用インクジェットプリンタ、各種制御盤などがある^[1]。いずれも工場の中で使われ、ビルの地下や店舗の片隅で使われている機器である。家電品のように多くの人々の目に留まり便利に使ってもらえるものでもなく、発電機・鉄道や大規模公共インフラに使われる機器でもない。お客様はプロからアマまで幅が広い。製品機能は単純で代替機が簡単に出てきそうだが意外と現れず、結構しぶとく長生きである。

ここでは長年これらの産業機器の分野に暮らしてきた者として、日立伝統のモータと、この関連製品である産業用電気品の変遷と今後の展望について述べてみたい。

2 産業機器の特徴

業務用機器と呼ばれるものは意外と単純な機能を持つ製品が多い。産業機器の機能をまとめてみるとこの単純さが手に取るようにわかる^[2]。

これらの機器の動作原理は18世紀から19世紀に確立している。電気系で言えば、モータはフレミングの左手の法則(1880年)、変圧器はファラディの電磁誘導法則(1831年)に従って動いている。流体力学系はさらに古く1700年代に確定したベルヌーイの定理などがその基礎となっている。よく見ると、こうした産業機器はいずれも人間が使いやすい形のエネルギーに変換する道具になっていることがわかる。すなわちモータは電気から機械エネルギーへの変換器であり、ポンプなど流体機器は、機械から位置エネルギーへの変換器となっている。

創業製品モータの外径は約44 cmであったが、約100年後の現在、同じ5馬力のモータの外径は20 cmとほぼ半分である^[3]。改善の大きな要因は主に絶縁材料の進歩と低



[1] 主な産業機器製品

南藤 謙二(なんとう けんじ)

1971年早稲田大学理工学部電気工学科を卒業し、日立製作所入社、習志野工場配属。汎用インバータの開発・設計に従事。1994年産業機器事業部副技師長・インバータ設計センタ長、品質保証部長、2002年株式会社日立産機システムQAセンタ/環境管理センタセンタ長。

技術士(電気・電子、総合技術監理)、エネルギー管理士。電気学会会員。



機器名	入力	出力
モータ	電力	トルク
ポンプ	回転力	水圧×水量
送風機	回転力	風圧×大風量
圧縮機	回転力	高圧空気×風量
ホスト/クレーン	電力	位置
変圧器	電圧(高/低)	電圧(低/高)
開閉器	電力	電力(入/切)
インバータ	直流電力	交流電力(可変)

[2] 産業機器の機能(入出力関係)

損失の電磁鋼板である。最近では回転子に永久磁石を埋め込んだモータが電気自動車の主動力として活躍し始めており従来の誘導電動機よりもさらに小型になっている。

3 産業用インバータの変遷

ここでは、モータよりももっと短時間に変化した産業機器の代表として、筆者が主に携わってきたモータ駆動用インバータに特化し、その技術・製品の変遷を深く眺めてみたい。

インバータは、直流を交流に変換する電子機器である。電力の世界では50/60 Hz周波数変換装置、家電ではエアコン制御、鉄道やエレベーターでは主電動機の可変速制御に、自動車では電気自動車の制御装置にそれぞれ使われており、いずれの分野においても、基本的な技術・部品となってきた。

インバータの最初の大きな用途は合成繊維業界であり、ナイロンなどの紡糸工程に多く使われてきた。多数の同期モータを誤差0.1%程度の精度で動かし、切れや

すい繊維を一斉に紡錘・延伸・巻き取る制御の手段はインバータしかなかったのである。工作機の主軸は直流電動機が主流であり、価格や大きさの点でインバータ駆動は時期尚早であった。5馬力(3.7 kW)の交流モータを駆動するインバータは現在、質量2 kgで、片手でも持てる程度の小ささであるが、30年程前は約1 tと実に500倍の重さであった。

インバータの劇的な変化要因は(1)パワー半導体、(2)モータ制御理論、(3)マイコンなどエレクトロニクス制御素子のそれぞれの技術分野における著しい進歩にほかならない。そしてインバータは、家電ではエアコン・冷蔵庫・洗濯機を、社会インフラ系では鉄道・エレベーターなどを省エネルギー化し、ギヤやベルトを介在していたメカニズムを一変させたのである。

この歴史的変遷期間において、開発・設計者としてその当事者であった筆者の目から見たインバータの進化について次に紹介する。

3.1 主回路の変遷

主素子は、ようやく実用になり始めていたサイリスタであったが、非常に制御が難しい素子であった。当時は一旦流れた電流を数百マイクロ秒で切断することが最先端技術であり、転流コンデンサと称する大型の特殊コンデンサの放電電流を使って、サイリスタに流れている電流を力任せに遮断するという荒っぽいことを行っていた。例えて言うならば、滝から落ちる水を止めるために、滝壺から上に向かって水を流すルートをつくり、流れ下



[3] 日立モータの変遷〔5馬力(3.7 kW 4極)〕

る水を止めていたようなものである。

こうした環境が1970年代後半まで続く。生産形態はいわゆる注文生産であり、顧客エンジニアと仕様を一件一件確認しながら設計・製造していた。その後、この大型コンデンサを減らす画期的な主素子であるGTO (Gate Turn-off Thyristor) が市場に現れ、モータに流れる主電流を直接扱うのではなく、GTOの制御端子(ゲート)によって、小電力で制御することが可能になった。

しかし、このGTOはサイリスタとパワートランジスタの中間的な性質であり制御が非常に難しかった。しかも過渡時の電流を吸収するために、前述したコンデンサのミニ版とも言えるスナバーコンデンサが必要で、当時の日立工場や日立研究所のGTO担当者と議論を重ねながら製品開発を行った。GTOは主に400 V受電系統にパワートランジスタは200 V以下の受電系統に用いられた。

現在では、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が発明され、かつては外部の回路で行っていた転流動作が、半導体の中でわずか数マイクロ秒の短時間のうちに行われている。大変な作業が半導体の中で行われていることに、過去を知る者はいつも驚き、尊敬の念を抱く次第である。

その後、大きな主素子の変化は、複合化、高耐圧化、大電流化へと動いてはいるが、現在までのところ、原理的な変更は起きていないように思う。ただし、材料的な変化の兆しが見え始めており、特に高電圧、高温での活躍が期待されるSiC系デバイスは有望で、日立社内でも研究開発が進められている。

3.2 モータ制御理論の変遷

直流電動機では、いわゆる古典制御理論に分類されるフィードバック制御理論が主流であり、例えば鉄鋼システムの分野においては、この精緻な理論で制御された日立の圧延機が日本の優秀な鉄鋼生産に寄与してきた。

直流機はフレミングの左手の法則どおり素直に動き、ほぼ印加電圧に比例して制御されるので保守を除けば、

もともと扱いやすいモータであった。しかし堅牢で安価な誘導電動機を思いのままに制御しようとしたときから、パワーエレクトロニクス技術者の苦労が始まった。回転数は制御できてもトルク(回転力)は簡単には制御できないのである。誘導電動機は直流機のように、電機子電流と界磁電流を別々には制御できないモータであったが、1970年代に入ってから、この扱いにくい誘導電動機を直流機と同じように扱う「ベクトル制御理論」が提案され、モータから発生するトルクを自在に制御できる道が開かれたのである。日立では、まず当時の習志野工場の汎用インバータに搭載し、日新製鋼株式会社呉製鉄所の鉄鋼システムに採用された。その後すぐに当時の水戸工場で開発したエレベーター駆動システムへと応用が広まった。現在では電車、電気自動車、工作機など、速度とトルクの双方を制御するモータには必ず使われている理論である。

この理論は、モータの中に入り込み、回転する磁界(固定子側)から回転子を眺め、制御しようとする考え方であり、当時、きわめて画期的であった。また、モータに印加する波形合成の理論も従来のPAM(Pulse Amplitude Modulation: パルス振幅変調)からPWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)方式へと進化し始めた。この方式は放送電波で言えばAM波からFM波への変遷に匹敵する大変化であり、インバータの中にあつた大きな二種類の主回路(順変換回路と逆変換回路)のうち、順変換回路で行っていた電圧制御を、逆変換回路の中で周波数制御と同時に行うことができ、装置のサイズを半減する効果があつた。ただし、これによって高調波と称する、モータを回転する以外の高い周波数もモータに加えられる結果となつた。発熱・振動・騒音の増加など、今でもモータには辛い思いをさせている。

3.3 制御回路の変遷

1970年代の制御はアナログ演算の時代であり、現在のようにマイコンを使って簡単に論理演算することが

できなかった。比例・加減算・微分・積分などの基本演算ができるアナログ複合装置は高価で大きく、当時の大みか工場や那珂工場では鉄鋼システム、計装システムに盛んに利用していたが、汎用インバータではなかなか使い切れず、トランジスタなどの個別部品を組み合わせで設計していた。周囲温度や電圧が変化すると、微妙に性能が変わってしまうので、この補正のために実験中の恒温槽で何回か寝泊まりする羽目になり半導体の温度依存性を文字どおり肌で感じることとなった。インバータ主回路の進歩はパワー半導体の進歩に依存し、電力回路部分の小型化・低コスト化に貢献したものの、論理回路が大きく残っており、まだ安価・小型にはならなかった。

第二の功績者はマイクロコンピュータである。当時は世界初の4ビットマイコンが電卓用に開発された時代で、モータ制御にも使えると考え、電磁継ぎ手の可変速制御装置の試作器に応用していたが、次々とマイコンの処理ビット数が増加し、演算速度も高速になり、われわれが制御回路上でつくっていた特殊波形をマイコンの中で演算・合成できると判断し、マイコン制御インバータ開発に着手した。マイコンで波形合成するためにはマイコンが演算に集中できるように制御信号の前処理が不可欠であった。例えてみれば、優秀な料理人(マイコン)に食材を準備する仕事に似ている。AD(Analog to Digital)変換器を内蔵したこの制御回路を専用LSI(Large-scale Integration)としても開発した^[4]。個別部品でプリント板に組み上げると量一枚分ぐらいの回路が必要になると考えられていたからである。

現在はマイコンにインバータ波形合成回路が組み込まれ、また高速の専用演算LSIがあり、設計者の負担は格段に軽減されたが、当時はそのような優れた機能のIC(Integrated Circuit)もなく、当時の武蔵工場(現株式会社ルネサス テクノロジー)に出向いては、マイコン設計部に指導を受けながら、LSIの開発から自分自身で行わなければならなかったのである。もちろんLSIの設計のイロハを日立の技術研修所で学んでからの作業であった。



[4] 汎用インバータ専用カスタムLSI

日立は伝統的に「世の中になれば自分でつくる」という会社であり、文字どおり「製作所」を地で行くことになった。学生時代、あるいは配属部署でモータやその制御しか知らない日立研究所と習志野工場のメンバーは、半導体工場の一設計者となってICのセル設計・レイアウト設計・回路シミュレーション・テストに挑戦した。大形コンピュータに匹敵する試験機は、半導体工場の多くの設計者が使うために時間制となっており、素人のわれわれが自由に使える時間帯は深夜から明け方しかなかった。ちょうど時差のある欧米の会社に出かけて設計していたような感じである。このLSI完成で操作系とマイコンとのつながりが格段に良くなり、回路の縮小化、ひいては装置の小型化にもつながった。また世界に日立の総合力をアピールすることができ、多くのメーカーから技術提携の申し入れを受ける端緒となった。

マイコンの取り込みはインバータ制御にソフト開発を持ち込むことになった。当時はソフトの基本言語であるアセンブラでマイコンが行うべき波形合成の手順を書いていたが、現在ではもっと生産性の高い高級言語で記述できるようになり、設計者の負担が軽くなった反面、多くのことがソフト上で可能になったため、インバータ操作系のソフトが膨大になり、かえって設計者や品質保証関係者の苦勞が絶えないという皮肉な結果にもなっている。

3.4 信頼性の確保

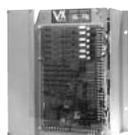
インバータの信頼性はきわめて重要であったが、黎明期は半導体も不完全、制御理論も現実のモータとは不一致の理想系で、マイコンソフトもミスが多く、現在のレ

ベルとはかけ離れていた。例えば、電源擾乱に弱く、受電電圧が低下したり、瞬時停電が起きると制御電源を確保できなくなり、主素子を破損させたりした。またインバータ出力側を短絡させたり、回転中のモータとインバータを接続すると、主素子が破損したりもした。さらに、急減速運転を行うとモータ側が発電機となって大きなエネルギーをインバータに返還してくるが、このエネルギーの処理回路を持っていないと即座に主素子が過電圧破壊した。汎用インバータとして不特定多数のお客様に販売するようになると、いかなる使い方をされても破損しないことが必須の条件となる。この考えは製品の信頼性技術を格段に上昇させることにもつながった。

例えば大きな慣性を持つ大型送風機や遠心分離器は、運転を終了しても数十秒あるいは数十分も惰性で回転し続けているが、この回転中に再度インバータ運転をすると電動機が急に発電機へと姿を変え、回転体の運動エネルギーをインバータへ返して来るため、回っているモータがインバータにつながれた瞬間に大きなトルク変動が生じ、最悪の場合には主素子破壊にもなる。このため、インバータ側で惰性回転中の回転数を計測

するために、少しずつ電力を惰性回転中のモータに印加することで、発生してくるモータ誘起電圧から惰性回転数と回転位相を計測し、インバータの周波数と位相を惰性回転中のモータに一致させショックレスで再運転するなどの技術が仕込まれている。例えて言うならば、走行中の電車で飛び乗るような技術である。

その他の保護回路としては、負荷短絡時の保護が挙げられる。一般に電力供給側の出力を短絡させることは装置に大きなダメージを与え、永久破壊になることが多い。インバータも当初は負荷短絡では破壊は仕方がないとする設計思想であった。しかし汎用インバータを販売する営業部門の意見はそうではなかった。お客様が間違った操作をすることも想定し、装置の停止は許容するものの永久破壊は困る、再度運転できるインバータを開発してほしいとの見解であった。当初この営業部門の要求は技術者にとっては途方もないものであったが、何とか応えたいとの思いが強く、半導体の中の電子やホールの振る舞いまで議論するようになった。トランジスタは基本的にはベース電流、或いはゲート電圧に比例した電流が流れる素子で、負荷短絡などの事故時の大電流が流れる状況下でもベース電流の制御を

西暦年										
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	
製品	注文生産									
演算素子	4ビット		マイコン (デジタル化)		32ビット					
主素子	サイリスタ		パワートランジスタ			IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)				
	GTO (Gate Turn-off Thyristor)			IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)						
	PAM (アナログ制御)		GTO (Gate Turn-off Thyristor)			IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)				
制御	PAM (アナログ制御)		GTO (Gate Turn-off Thyristor)			IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)				
					PWM (デジタル制御)					
						ベクトル制御				

[5] 汎用インバータの技術的変遷

行い、過電流検出と制御遮断時間合計で50 μs以内で処理して主素子にダメージを与えず保護できた。

このように汎用インバータとするため、技術的に厳しい数々の要求が機能として標準装備されていった^[5]。その結果、汎用インバータは、きわめて信頼性の高い電機品として、世界中で販売も可能となり、日立の汎用インバータは欧州のBBC(ブラウン・ボベリ)社(現ABB社)や米国のウエスチングハウス・エレクトリック社などにインバータの技術供与が実現したのである。

4 産業機器の今後の展望

産業機器は、使用する材料と工作技術、そしてニーズに対応して今日まで確実に進化してきた。そのうえで今後、どのように進化していくのかについて、「小型化」、「高速化(高周波数化)」、「情報化」という3点から展望してみたい。

4.1 小型化

小型化はこれまでも十分行われてきた。絶縁距離や機械的強度、操作性などの問題により、これ以上小さくすると、かえって使い勝手が悪くなるかもしれないほどのレベルにあるものの、モータでは永久磁石を回転子に埋め込んだものや超伝導コイルの採用などで小型化を図っている。磁力と電流をさらに強める材料や手段で操作性を損なうことなくいっそうの小型化が実現するはずである。

4.2 高速化(高周波数化)

一般に回転機械は高速にすれば小さくできる。モータの仕事は、回転力×回転数で決定するからである。モータを搭載する機械側の事情(遠心力、潤滑、騒音、振動など)が解決できれば、もっと小さな機械で同じ仕事が可能になる。電気の世界では周波数を上げて使うことと等価で、携帯電話用の小さな充電器はこの考えを利用している。すなわち充電器の中に入っているDC(Direct Current)DCコンバータの変圧器は商用周波数(50/60 Hz)

の1,000倍以上の高周波で駆動しており、その結果、変圧器も小型化した。将来、産業用の変圧器の世界でも類似のことが起こる気配を感じる。

4.3 情報化

最近の産業機器は急速な情報武装を進めている。例えば制御装置の中核を担うPLC(Programmable Logic Controller)などはパソコンのようなもので、それ自体は何もエネルギー変換はしないものの、エネルギー変換する道具を制御する上位コントローラとして、モータやポンプなどを制御する必須アイテムとなっている。PLCは、開閉器などを製造していた工場で知能付き開閉器といった状態で生まれてきたものである。またサーボモータは回転速度・角度を微妙に制御するモータであり、主に位置決めに使われ、体育会系のモータではない。このようにマイコンの応用により知恵を備えて微細な動きができるマシンも登場し始めている。

5 おわりに

日立製作所創業製品のモータをルーツに持つ産業機器は、今後も材料の進化に伴い、みずからの形を変え、また情報機器の発達に従って、その機能の一部を取り込み続けていくものと思われる。また昨今の地球環境問題への意識の高まりから、その打開策の一つとして省エネルギー産業機器の活躍が期待されている。

われわれは技術力、総合力、そして日立精神と言われる「和」、「誠」、「開拓者精神」の下で、社会のお役に立つ製品を一世にわたって提供してきた。この間、多くのお客様に支持されてきたことを非常に嬉しく、かつ誇りに思っている。

社会インフラを支える基盤製品の担い手として、これから先も長くご支持いただけるよう、研究開発・設計製造・サービスを通して社会の発展と繁栄に貢献し続ける所存である。