

## ベクトル制御 AC 電動サーボモーターの水車制御への世界初採用

### 1. 前書き

H 電力会社初級管理者として M 支店管内の発電設備の統括の任について間もなく、管内電気所の事故続発に遭遇することとなる。経験不足の監理者を少し鍛えて品質向上を図り社会に役立つようにとの神の思し召しかなかなか成長しない者への叱咤激励か会社の事故調の被告席に毎月連続で 1 年半座り続ける羽目となる。最初は U 発電所の発電機用 6KV 遮断器のブッシング(碍管)パンク事故である。通常は見かけ上 6 本中 1 本パンクでも正規の耐圧試験を行って交換復旧すべき処、秋の豊水期フル運転中の発電所を 1 月停止すると約 3 千万もの損失なので、メーカー指導員の下、絶縁抵抗試験と外観点検で OK として復旧、2 か月後に再発事故となり、全数取り換えとなる。絶縁ベークライト板の工場試験室での急速劣化試験と現場でのヒートサイクル劣化との差である。次は A 発電所でのモールド型計器用変圧器 (PT) パンクである。パイプフレーム型のオープンタイプの変電設備なので火炎がケーブルを走り回り開閉器室全滅事故である。これも工場試験室での急速劣化試験で 30 年寿命と称されたものが数年で劣化パンクであった。A 発電所は室蘭市の大型製鉄所のストリップミルの変動負荷を会社大先輩方が開発した追従運転方式で電圧変動、周波数変動を抑制する運転方式で殊の外負荷変動が大きくヒートサイクルも厳しく劣化が進んだものとの解明である。但し小型軽量、油無しの最先端技術のモールド型も、寿命劣化が計算値より大幅に短く全道的にも事故多発の徴候を見せており、次の事故も発生。工場試験室の計算値とフィールドの差が感じられた。一旦事故発生すると、当該部門は 1 週間から 1 か月、殆ど徹夜状態に近く、突貫工事で復旧に当たらねばならない。事故調の被告席に続けて座ると、周りから厳しい批判を受け、褒められること無し。

2 回、3 回と事故処理が続くと、同じ事故処理では税が上がらないので何か良い知恵はないものかと種々知恵を絞ると、社の専決規定で事故等の非常時には社長権限が現場の新任管理者まで降りることが分かり、社長なら如何するかといえば再発防止の徹底、信頼度向上が電力事業の使命なりとなり、社内相談するとベテラン管理者方が快く指導協力してくれた。従って当該部門としては、事故発生で速報をまとめ関係部門に報告、上層部まで報告、メーカーの上層部の方に速報を入れて、事故品だけでなく発電所内一式取り換え方式として、略一週間で事故復旧出来る目標で取り組んだ。社長権限が現場まで降りると全て円滑に進んでメーカー側も最大限の努力で応じて頂き、その後再発事故がこの管内の現場では無となった。その頃はワンチームの言葉もなかったかもしれぬが、社長から現場までワンチームで業務遂行できたと思われる。

これらと相前後して、油関連事故も種々続発している。①圧油黒化現象：圧油ポンプの圧縮動作の製造ギャップずれによる断熱圧縮による黒化劣化現象→圧油全量取替と 1 週間～ 10 日程度のフラッシング作業と圧油ポンプギャップ修正ポンプへの取替→豊水期にはダム放流による莫大損失化。②油劣化に基づく粘着力増加による精密機器である调速機パイロットバルブの固着、制御不能→長時間油フィルタリング作業。③配管切削くずによるパイロットバルブ制御不能→事故点探索に長時間検索作業と分解、手入れ、組み立て作業。④圧油制御调速機システムの局部共振現象による配管破断、油流出事故→流出油を発電所内配水ピットでの長時間吸着処理作業→局部共振現象把握までの電気部分、機械部分の解析、原因究明作業→原因解明進まぬ前の仮復旧による事故再発→長時間復旧作業の繰り返し→莫大損失化 ⑤配管工事後のフラッシング作業(1 週間～

10 日間の徹夜作業)による疲労増大、漏油等による建設時、営業運転時の建屋汚損のメンテナンス。⑥システムの占有面積、体積の大きさ。⑦油保管による火災危険の増大。等又圧油システムとは離れるが ⑧メタル潤滑油の漏油、蒸発漏洩、冷却水配管不良による混水事故→分解組み立て、油取替 ⑨メタル油槽組み立て時のボルトワッシャー落下等によるメタル焼損→分解組立、油取替。等々油事故は枚挙に暇がない程である。

何よりメンテナンス上、営業運転上事故発生時点の予測がかなり困難で、当にならない給電電力となり、予備力を多く持たざるを得ない要因となり、生産性低下となる。又発電所は略全数遠方制御となり、生産性向上を図っている筈が、遠方出向となり、逆方向となる。

## 2. ベクトル制御 AC 電動サーボモータ (VCACIMSM→IM 型 ACSM) の採用

発電電工事課勤務となり、H 発電所建設工事担当時、M 社より水車サーボモータ制御に標記 IM 型 ACSM の採用の提案があり、これを検討。新エネ産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究の成果の実用化を狙ったもので ①コストダウン (圧油ポンプシステムの省略、機器配置簡単工事費低減) ②保守容易化、水車発電機の解体組み立て工事も容易 ③省エネルギー、省資源 (圧油ポンプに比べ消費電力の軽減、圧油関係の油が不要となり、倉庫も縮小可) ④油減少により火災対策も縮小 等のメリットがある。新技術を採用すると、実績はないので導入時トラブルを拾っては新技術の採用が裏目に出るので、トラブルつぶしに専念。圧油 SM システムの過去のトラブル、事故例 (社内、国内、海外) を分析し、新技術採用による事故、トラブル発生予防に努めた。NEDO の委託研究の実物見学、データ検討。IM 型 ACSM に使われるボールねじは社内使用実績がないので、メーカーに無理をお願いして専門メーカーを見学、製造現場の温度管理が  $25 \pm 0.5$  度、湿度管理  $50 \pm 3\%$  との安定条件の生産条件に納得。本採用を決定。工事も順調に進んで油関係事故、トラブルの大幅減少、山奥への出向減少、コストダウン、

信頼度向上の第一歩を踏み出すことができた。

## 3. ベクトル制御の開発歴史

M 社納入の IM 型 ACSM の水車制御への採用は世界初となり、現在は M 社製も 100 台以上となり、水車调速機制御から、入り口弁サーボ、ランナベーンサーボへと拡張され油関係事故、トラブルの大幅減少と信頼度向上に役立っている。三相誘導電動機 (3φIM) は幅広い電動機の種類の中で、小型特殊電動機を除くと、現場で圧倒的に多く使用されており、回転子の構造により「かご型モータ」と「巻き線型モータ」があるが、単にモータと言えばかご型を指す程多く使用されており、構造が簡単で堅牢、消耗部分がなく取り扱い簡単、安価でメリット大であるが、速度制御を要するものについては直流 (DC) 電動機や巻き線型電動機が使われてきたが、構造が複雑となりメンテナンスに難点があったが、近年のエレクトロニクスの進歩によりインバータ制御、なかでもベクトル制御の開発適用により直流電動機速度制御性能と同等又はそれ以上の性能を発揮出来るようになり、可変速制御の適用範囲を大きく拡大してきている。ベクトル制御の発明はドイツで行われ、フィールドオリエンテーション制御すなわち磁界ベクトルの方向を基準座標軸としてモータの電流ベクトルの大きさ、方向の瞬時値制御 (誘導機の一制御方式) として Hasse によって学会発表され (1968 年)、Braschke によってより一般化された制御概念として体系化され特許出願 (1969 年) された。しかし当時の技術レベルでは制御装置のハードウェアが複雑で高価という難点があり、1970 年代前半では電気動力計など一部の製品で実用化されるに止まった訳です。ベクトル制御の実用化は日本で中、大容量可変速駆動実機適用として 1979 年に抄紙機及びスーパーカレンダ設備用として初めて実用化された。1980 年には鉄鋼など圧延機駆動用としてサイクロコンバータによる誘導機及び同期機のベクトル制御が実用化された。ベクトル制御には座標変換やベクトル演算など乗除算、非線形を含む複雑演算、交流瞬時値制御に対応出来る高速演算を必要とし、その制御演算処理規模も直流機駆動の場合に比

較して数倍に増大する。1970年代のベクトル制御の性能とコスト両面に亘る解決のための研究成果である。本家ドイツでは利益率の良い直流機駆動システムの販売を継続のため製品化では日本より遅れた訳です。ベクトル制御の研究はこの後、通産省大型プロジェクト「レーザ応用複合生産システム」(1977～1984年)の中に活かされACサーボ系への開発へとつながり、実機適用の一つとして水車制御用AC電動サーボの初採用となる訳です。日本のエンジニアリングの父なる国米国と母なる国欧州特にドイツで開発された技術の実用化は当然ドイツと長年信じていた処、M社技報2015年版に世界初適用と掲載され、驚いた次第です。

#### 4. 世界初の技術、日本初の技術、メーカー初の技術との遭遇、事故体験

新入社員の教育期間的時期に真空管式電気式調速機の現場勤務となる。道内の最新式発電所で設備も新しく、取説も充実していて、見るもの、聞くものすべて関心の的だが、社の3年毎の精密点検周期でも新人には分解させて貰えない。ある直勤務の日、系統事故があり、発電所を含む浦河系単独運転となる。当然全系統運転時と単独系では系統定数が異なるので大幅に電圧、周波数変動が大きくなったが、マニュアル通りに系統時定数に合わせて調整すると安定運転となり、電気式調速機の性能に感心する。古い時代の機械式ではベテラン社員が勘を頼りにあちこち調整して運転維持に苦勞するのに、電気式では新人でも略苦勞なく対応出来る。最新式の勉強習得には建設所希望が重要と感じ手を挙げる。○建設所勤務である。水車制御用電気ガバナはトランジスタ式でT社1号機である。現地調整試験を行う指導員が左右も良く分からぬ新人にとっても親切で、工場試験調整は充分検討したが、現地調整は初めてなので自分もとても勉強になると言っていて、現地調整の進め方や試験データを懇切に解説、指導してくれた。水車発電機組み立てで軸受けメタル組み立て時にワッシャを1個落としたのを作業員がきちんと報告せず試運転でメタル焼損し、分解組み立てとなった。水車発電機の試運転で振動が予想よりかな

り大きく、1週間位種々検査するも判明せず、現場困惑、同僚のC社員がロータの電気抵抗測定を直流で測定し、異常を見つけられなかったのをコイルなので交流で測定してはと提案し、直流では正常、異常の差異判別できなかったのを交流では大幅な差異が出て、レアショートが判明、巻き線修理となる。この後回転子の検査は交流測定が社標準となる。徹夜等を含め相当苦勞した設備が完成に近づき、仮設電源送電線から本設電源送電線に切り替え、切り替え手順にミスがあり、発電機急停止、圧油タンクを使い切って再起動不能、屋外変圧器用窒素ポンペを発電所に搬入、圧油立て、再起動し系統並列した。全ての段階に少しでもミス、トラブルがあると工程大幅ずれ、徹夜作業の連続となる。直属上司は徹夜連続で髪が真っ白になる。営業運転後、2か月位で圧油槽油面ゲージが黒ずんで来る。ベテラン社員に見て貰うも誰も経験無く、しばらく様子を見る。黒化進む一方なので所長に報告。社としては今まで経験無いので中央他社等に照会、圧油黒化現象ということでメーカー対応、圧油ポンプ取替、圧油全量取替、フラッシング作業に。この間も支水路取水口の水位計が正常に働かず、ダム水量算出が適正に行われず、現場にメーカー技術員が二度程各1週間張り付くも良ならず、最後は一か月以上現地駐留して動作検査、調整ようやく略正常に。新規製品の初期故障はバスタブ曲線の通りで、ここをつぶすには徹底した事故、トラブル分析が必要になる。社内では当時はホールソート式事故、トラブル報告書でテーマ毎の事故内容を全て目を通してポイントを整理、分析して新製品対応に活かすことが必要である。全国的には同業他社に情報依頼、世界的にはメーカー情報網での情報提供依頼、種々の分野の方々に多大のご指導を頂いて、少しずつ前進である。

#### 5. 他事故、トラブルからのヒント

##### ①60KV、190KV 避雷器のパンク事故続発

全道的に各地で雷害時等に保護装置である避雷器自体がパンク、場合によりパンク時の異常電圧が系統を伝搬して他電気所でもパンク、事故拡大する例も。種々メーカーで解析を進めると、セメンチングの

性能不足で工場試験室でのヒートラン試験、寿命試験では 30 年の寿命あるものが、フィールドでは微小亀裂から浸透した水分の凍結融解の繰り返しにより水分、湿気が内部に浸透して劣化パンクに至ることが判明、セメントの更なる緻密化を図り、特性改善して OK となった。道内で屋外タイルのセメンチング不良で多量の落下事故、トラブル発生と類似の現象であった。異常電圧の系統伝搬、事故発生は雷の異常電圧の周波数範囲がとても広く、避雷器のランクアップで対応せざるを得ない現状と思われる。地震波のレベル予測、周波数予測がなかなか進まぬなかでの地震対策が進まないのと類似性が感じられる。

道内進出を要請した企業殿から思わぬ高調波が発生していて、各系統に伝搬して各地でコンデンサのうなり、発熱、膨らみ等が発生してローカル共振の怖さを感じたのも、未だ々々事前解析の及ばぬ処である。雷害防止も避雷器の容量アップと接地抵抗と衝撃接地抵抗の大幅低減でかなり防止技術は進んでいるが、コストダウンは大電圧、大電流、大エネルギーに対しては遥かに道遠しである。セメンチングの劣化等は道内使用前にフィールドに仮置きして経年劣化を検出する対策は採っているが、30 年寿命を 2～3 年検出するのはかなり難しいと思われる。

### ②6KV、60KV、190KVLRA タップチェンジャによる絶縁劣化でのパンク続出

タップ切り替え時のアークによる絶縁油劣化で、劣化蓄積で工場試験室での寿命と現場時間経過での寿命差もありパンク事故続発となる。

### ③変圧器本体補強リブのピンホール等からの侵入水の凍結融解繰り返しによる変圧器事故続出

変圧器本体補強の補強リブは溶接接着されるが溶接不良があるとピンホール等が発生し、ここから侵入した水が凍結融解を繰り返してタンク破損、変圧器パンク事故となる。溶接技術の向上と検査充実が必要だがピンホール検査は意外と容易でなく思わぬ盲点となる。工場検査で盲点となっていた処は営業運転後の点検で検出するのは更に難しく、的確な検

査法の確立と排水処理策が必要である。ましてや工場試験室試験で補強リブ水満杯でパンク検出は不可能である。

## 6. 新技術への挑戦

### ①道南 N 発電所屋外設備の増強

設計時、セメント工場の増強に合わせて用地取得後に、青函トンネル着工予定が進んで、引き出し送電線の増加設計が必要となる。山裾の用地取得で土地造成費も大きいので 2 回線引き込みを 3 回線引き込みに設計変更することに。従来設計では当然納まらないので要工夫。社の大先輩がフランス留学（フランス電力公社、EDF）から持ち帰ったパンフレットに欧州の電力ネットワークは網目状になっているので 1 か所電気所パンクしても周りから救援給電可能なので、3 相電力の RST 各相を同相を極端に接近して設計、変電設備用地を大幅縮小している。日本にはこの設計手法はないので、裸線設計をパイプ母線として風力、地震による振れを抑えて、従来設計では甲母線、乙母線を分離配置設計だが、これを相互に RR'、SS'、TT' と接近させて設計、用地縮小、略 7 割の縮小で「仮称フランス式屋外母線」として変電設備を増強した。停電作業時の甲母線機器点検時は従来母線では停電範囲と活線範囲は分離されているが、新方式では両側母線が活線であり、1.5m の離隔範囲に誤って手を伸ばせば 100% 感電死亡となり、絶対的に作業ルールを守らねばならない。作業中もヘルメットの中の髪の毛は逆立ち、活線作業同様の緊張を強いられる。これを社の標準にしたかったが、恐ろしい話が先に流れて不可に。従来設計比約 2 千万円の工事費削減（現在価値約 2 億円）でこのテーマで技術士論文も通して頂いた。残念ながら標準化出来ず世界で只一つの設計例に。

### ②全三相一括 GIS の世界初採用

原子力の会社初導入に合わせ、受電箇所となる NN 変電所と NT 開閉所の設計時、メーカー T 社殿から屋外変電所の新標準となっていたガス絶縁変電所（GIS）の三相分離方式を一本のタンクに RST 三相一括組み込みの全三相一括 GIS の設計が可能とのシ

ミュレーション設計や、一部試験データ進んでいるので採用してほしいとの話があり、国内規格試験等も定まっていないが、大幅コストダウン、この部分での感電事故無しで安全性向上、用地縮小で将来性に適う等宿題を残しながらも採用決定、変電所、開閉所への運搬道路整備等の地元要望に応じて、引継者につなぐ。竣工までには宿題解決等かなりの苦労があったとの事だが無事完成。

### ③通信事業での課題

国の方針の促進のため、電力事業も通信事業を手掛けることになり、国の方針に沿って種々取り組んだ。社内の通信専門家が夫々新規通信事業へ出向となり、手薄となってピンチヒッターの形で通信事業担当に。基盤のほとんど無い処を事業を組み立てていくので相当の起業家精神がないと進められない。TV会議システムやテレワークを推進しようとしても長年の枠から簡単には抜け出せない。未知の新規事業に挑戦する時は、全くの別人になりきれぬ自己変革が必要で、片方でやや安定した(現在は危機的だが)事業基盤の上にいると縦割りとか、自部門優先で総合協力でない部分が見えぬ処で種々あり、新任管理者時代の事故乗り切りのワンチームが懐かしい。本道の課題となる主として寒冷地仕様の国内基準化も「ランチェスタの戦略法則」で「3%経済で2乗で効く」と約百分の一となり全国で千台購入、本道で十台購入で十台の仕様を標準化してとは「馬鹿も休み休み言え」のレベルでしょうと簡単に却下、標準化見送りになり、実現不能のまま、馬鹿を重ねたことになる。最近の新型コロナウイルス問題でTV会議やテレワークが少し動いているようであるが、やや30年近く経過しての危機状態で一部動きが促進されたと思われ、平常時に革新に挑戦するのは余程の行動力が必要である。業務の傍ら、経産局のお手伝いで省エネセンタを10年少々手伝わせて頂いたが、日本の専門誌、図書はまだかなり難解で、現場で即理解、実行できる形とはやや遠い。欧米の専門書は多民族国家が一部ベースにあるせいか、明快にかかれていると思う。トヨタ工場の電気室に伺った時、こんな問題迄掘り下げて取り組み成果を

上げているのかと感嘆した。自分が電力技術者のつもりが恥と思うレベルである。各社の現場技術者が即理解できる図書、マニュアルなら省エネももっと進展するだろう。標記ベクトル制御の解説もメーカーに依頼したら学会発表論文を提示され、電力会社なので電検3種程度のレベルで依頼、これでも難解なので電気初心者の2種電気工事士レベルでお願いしようやく解ったと感じたレベルである。このことが現場隅々まで浸透しているかと思う。業務合理化もフォーマットでなく、内容評価を伴う合理化が望ましい。事故対策マニュアルも例えば大規模雪害時拠点から事故箇所まで通常の状態では30分で到着するように要領よく書いてあり、実態は略通行不能で半日たっても到着しないので事故復旧が進まないことになる。もっと現場目線、実態目線で取り組む必要がある。電力系統運用の立場から見れば最新技術を導入する時、どこまで不確実性をつぶせるかが肝要である。電力系統が大きくなると安心感が出てしまうが、気象異常、地震災害異常、津波異常等従来の想定を上回るものがどんどん出てくる時代、不確実性の積みあがる最新設備では心もとない。水力設備のように安定した(温度変化少ない条件下)長年の実績のある技術でも、予測しづらい問題点があると、当てにならぬ電源となり、系統運用上のお荷物となる。本道のガスタービンの運用に携わる機会があったが、道南のNガスタービン(NGT)と最北端のWガスタービン(WGT)の系統事故時の緊急始動成功率を見ると温暖地帯にあるNGTが極めて悪い。始動失敗を見ると凍結問題が意外に多い。寒冷地のWGTは冬に入る時、春に戻る時凍結が問題となる0℃近辺を短時間通過するが、温暖地のNGTはシーズン入り、出の時長時間0℃近辺を上下に通過し凍結条件を常に通過する。そのためダンパシリング凍結、制御空気配管凍結、燃料タンク外部配管凍結歪による給油不能など寒冷地WGTよりはるかにトラブル多い。これが寒冷地の方が厳しいと常識的に考えている保守員の盲点となり、事故対策用GTの用をなさない。ハインリッヒの法則でも大物事故の300倍の少々の問題点を完全につぶせば大事故無となる。大型電源は部品点数も莫大に

なる。不確実性は徹底的につぶして信頼性向上を図る必要がある。

## 7. あとがき

ベクトル制御 AC 電動サーボの水車制御への適用で事故対策を主眼として、昔の取り組みを纏めた。本来なら回路図、写真、図表を駆使して理解を深めて頂くのが本筋であるが、過去多少纏めていた資料を胆振東部地震の高所積み上げ資料崩壊で見つげられず、過去の記憶も薄れている今日、再度、メーカー資料、技報、学会資料等を訪ねて記憶ある部分と併せて、文章のみで纏めたのでご容赦下さい。本道の寒冷条件は時間積分が必要と思いながら果たせず、今後の若者達に期待したい。構造物の基礎設計も古代の記録が無いため、本道は地震レベル、被害レベルが低いとされ、雷害対策を見ても、レベルはすこし低いが継続時間は圧倒的に長く、積分レベルでは夏雷の 100 倍ものエネルギーレベルの冬季雷が本道では殆んど着目されず、折角の通信網、電力網、ICT 技術が常に壊滅的被害を受ける危険をはらんでいると思う。これらを少し打破して経済基盤、技術基盤の向上することを切に願います。

**斧 良彦** (おの よしひこ)

技術士(電気電子/機械/建設/  
経営工学/総合技術監理部門)

千翔エンジニアリング株式会社  
技術部技術長

