

大容量同期電動機の低周波同期始動

Low Frequency Synchronous Starting of Large-capacity Synchronous Motors

堀尾 公一* 塚田 勝彦**
Kōichi Horio Katsuhiko Tsukada

広瀬 俊一*** 和田 栄吉****
Shunichi Hirose Eikichi Wada

Self-damper starting is the most prevailing type of starting method for synchronous motors for driving blower, compressors, etc. in the steel and chemical industries. However, in the case of large-capacity units, the damper starting presents a problem concerning its effect on the whole system, and in the case of large-capacity cylinder revolving field type units, the heating of rotor surfaces often makes it difficult to apply damper starting. The low frequency synchronous starting method is being favored as the one free from such shortcomings.

In this article are introduced the outline of recent cylinder revolving-field type synchronous motors, starting methods for synchronous motors, and a 16,000 kW cylinder revolving-field type synchronous motor for which the low frequency synchronous starting method is applied.

1. 緒 言

近年、産業用特に製鉄所などの設備の新鋭化、規模拡大に伴い、ブロワ、コンプレッサなどの駆動用として使用される電動機も大容量化および高速化の一途をたどっている。従来、これらの駆動用電動機として三相誘導電動機が用いられてきたが、力率、運転効率および機械的強度の観点から高速機では同期電動機が有利となる。すなわち、高速同期電動機にはソリッドポールを採用できるという利点があり、特に円筒回転界磁形同期電動機はタービン発電機と構造がほとんど同じであることから、多くの実績もあり信頼性が高いといえる。

自己始動大容量同期電動機の場合の問題は始動時に系統に与える擾乱(じょうらん)が大きくなることであり、これを防ぐため採用されたのが低周波同期始動方式である。この始動方式では同期電動機のほかに1セットの始動用電動発電機が必要であるが、複数台の同期電動機を系統に擾乱を与えることなく順次始動できるという利点がある。

日立製作所では最近、低周波同期始動方式を採用し、共同酸素株式会社鹿島工場向けとしてコンプレッサ駆動用・16,000kWならびに6,000kW同期電動機、またこれらを始動する5,000kVA同期発電機、5,100kW誘導同期電動機の発電電動機セットのほか電気設備一式を製作納入し、現在好調に運転中である。

本稿では低周波同期始動方式の紹介と同機の試験結果について述べる。

2. 同期電動機および始動方式比較

2.1 同期電動機の構造

円筒回転子形同期電動機はタービン発電機の構造とほとんど同じである。

同期電動機は約50MW以下のものでは空気を冷却媒体として、またそれ以上の容量の場合には水素を冷却媒体として運転される。水素冷却機はもちろん空気冷却機においても塵埃(じんあい)およ

び湿気の侵入を防ぐため閉鎖循環通風方式を採用している。そのため冷却ファンと冷却器を内蔵している。

2.1.1 固定子

固定子の外観は図1に示すとおりである。固定子は溶接鋼板構造で、運転中の振動や不平衡磁気吸引力に対しても十分耐えられるようになっており、固定子鉄心の支持とともに冷却風の通路となっている。

固定子鉄心には鉄損を減少させるため、高級けい素鋼板を使用しており、鋼板を適当厚さ積むごとに通風ダクトを設けている。

固定子コイルは2層重ね巻で、おのおの絶縁された素線を溝(みぞ)内で図2に示すように転位しうず電流損の増加を防いでいる。転位され成形されたコイルはマイカテープで幾重にも絶縁され、その中にエポキシレジンを注入して完成するものであり、絶縁破壊電圧が高く、耐熱特性もすぐれている。固定子コイル端部は始動時、運転時の電磁力によるずれおよび変形を防止するため、ステータエンドプレートに取り付けられたコイルささえリングにガラスひもによって強固に支持されている。

2.1.2 回転子

回転子は単一鋼塊で構成され、全面にわたり超音波探傷が行なわれている。また各部から多数の試験片を採取し厳格な試験に合

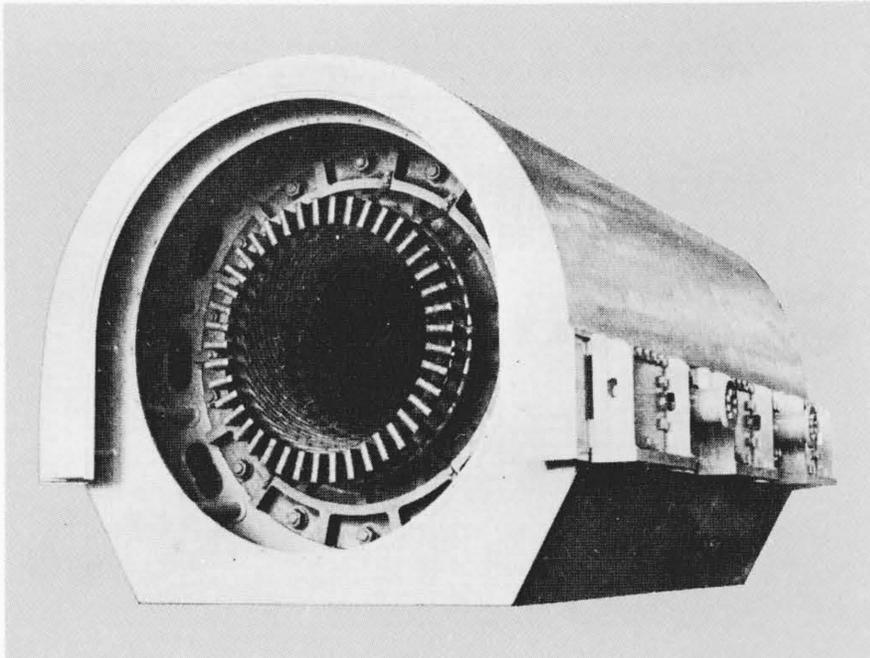


図1 固定子

* 住友金属工業株式会社鹿島建設本部
** 共同酸素株式会社鹿島工場
*** 日立製作所日立工場
**** 日立製作所大みか工場

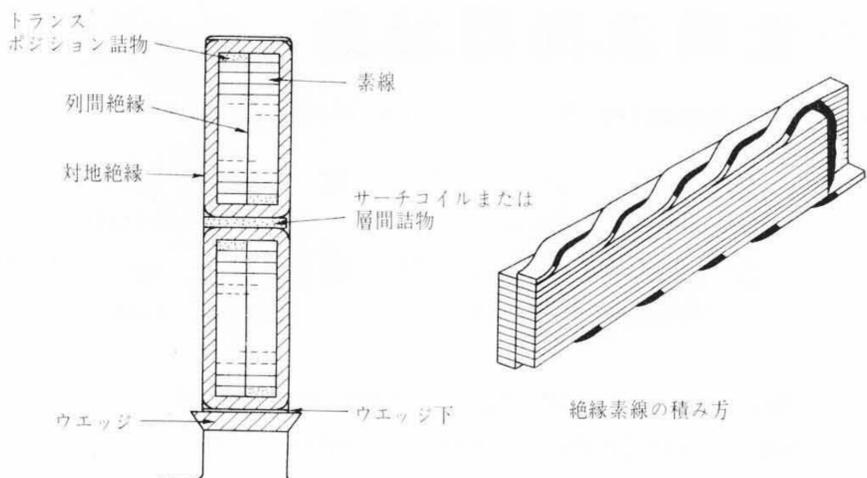


図2 固定子みぞ内コイル断面図

格したものが使用されている。

回転子にはコイルを入れる溝のほかにも歯部にも全長にわたって通風溝が設けられ、胴部両端からこの溝に冷却風が送り込まれ、通風溝のくさびの通風孔から空隙(くうげき)に放出される。回転子コイルは金属性くさびによって溝内に保持されている。このくさびには回転子コイルの回転による強大な遠心力を保持するに十分な信頼性のある材料を使っている。

ファンは強力かつ高性能のラジアルファンで、回転子の両端部に取り付けられている。

回転子コイルはあらかじめ成形された銅帯を溝にそう入しながら組み立てられたもので、溝絶縁は強く圧縮されたアスベスト、マイカを主体とするB種絶縁で、高速回転による強大な遠心力および熱膨張による応力に耐えるよう考慮されている。コイル端部に加わる遠心力はコイル保持環によってささえられている。

スリップリングはマイカ絶縁を隔てて軸上に焼ばめされている。スリップリングが高速で回転したときブラシとの間の空気層の圧力が上昇してブラシを浮き上がらせるのを防ぐため、スリップリングの外周には、らせん状の溝を切り、スリップリングとブラシの間の空気を溝を通して排出している。これによりブラシの接触抵抗は均一となり、溝を通る空気のため冷却効果も良くなる。図3は完成した回転子を示したものである。

2.1.3 通風方式

図4は固定子鉄心背部と固定子側板との間の空気が軸方向に三つの方向に分割されている場合の通風例を示している。排気室を出た温空気あるいは温水素は冷却器により冷却され、再びファンに至る閉鎖循環通風となっているので、通風路内の空気あるいは水素は外気と断され、ちりや湿気が通風路内に侵入すること

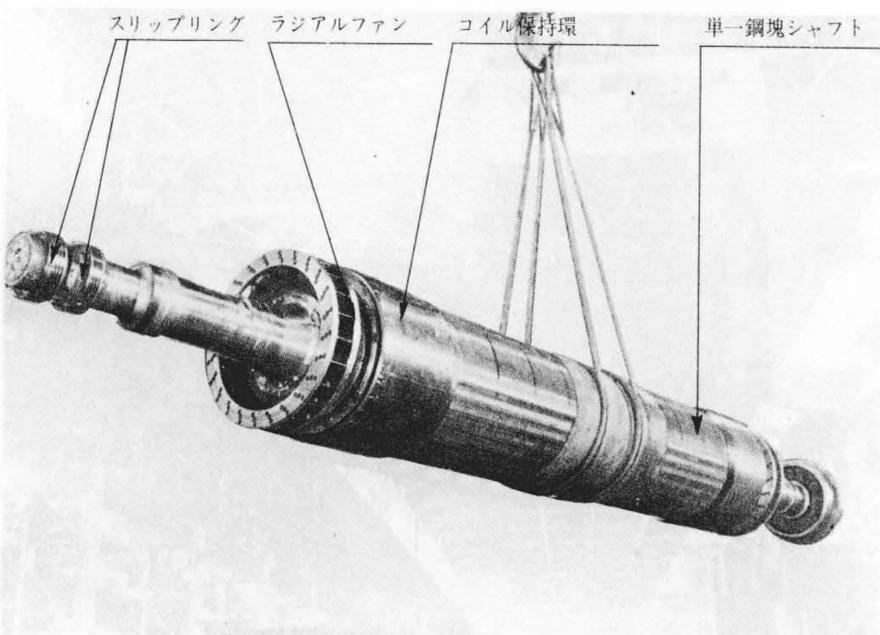


図3 回転子

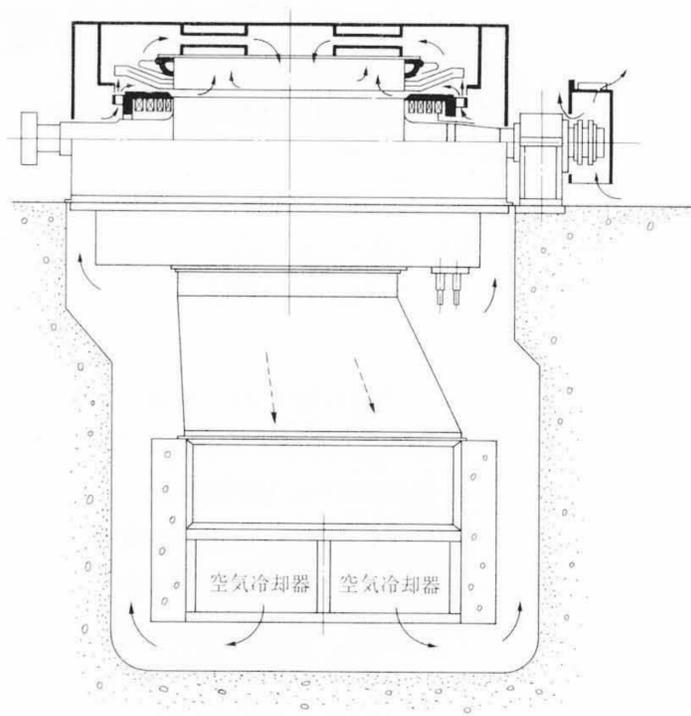


図4 通風経路図

による電動機寿命低下の心配がない。

2.2 同期電動機始動方式

同期電動機を始動する各種方式の得失について述べる。

1 直結電動機始動方式

この方式は巻線形誘導電動機あるいは誘導同期電動機を同期電動機と直結し同期速度近辺あるいは同期速度まで加速した後、同期電動機を系統に投入する方式である。

巻線形誘導電動機を使用する場合、短時間ではあるが同期電動機を非同期運転することになり、系統に擾乱を与えることおよび高速大容量機の場合には始動用誘導電動機の積層鉄心の機械的強度の点で採用が困難な場合があることなどの問題がある。誘導同期電動機の場合も同様である。さらにこの始動方式では始動後空転損があるため、同期電動機の効率を下げる点に難がある。

2 ダンパ始動方式

小容量同期電動機の始動方式として、広く使用されている方式であるが、定格速度まで非同期運転するため、大容量機では系統に擾乱を与えるため、また同筒回転子形同期電動機においては、回転子表面加熱の問題があるため、この始動方式は採用できない場合が多い。

3 低周波同期始動方式

低周波同期始動方式は始動設備として始動用電動発電機セット(以下M-Gセットと呼ぶ)を設置し、図5に示すように、このM-Gセットの同期発電機(以下ACGと呼ぶ)を主同期電動機(以下SYMと呼ぶ)と電氣的に接続し、両機を低周波で同期させた後、M-Gセットの誘導同期電動機(以下ISMと呼ぶ)でACGとSYMを同期状態のまま加速し、SYMを系統に投入する方法である。この始動方式の特徴として次の点があげられる。

- (1) SYMはACGと同期した状態で加速するため回転子表面の加熱がない。
- (2) SYMを系統に投入時、系統に与えるショックが少ない。
- (3) 複数台のSYMを始動するのに1台のM-Gセットがあればよい。また、SYMを次々と始動できる。
- (4) SYMとM-Gセットは電氣的に接続されるため、これらは任意の位置に設置できる。
- (5) SYMとM-Gセットの回転数は同一でなくてもよい。したがって、M-Gセットは製作上最適な回転数にできる。
- (6) M-GセットはSYMの始動時以外は停止しているので保守点検が容易である。

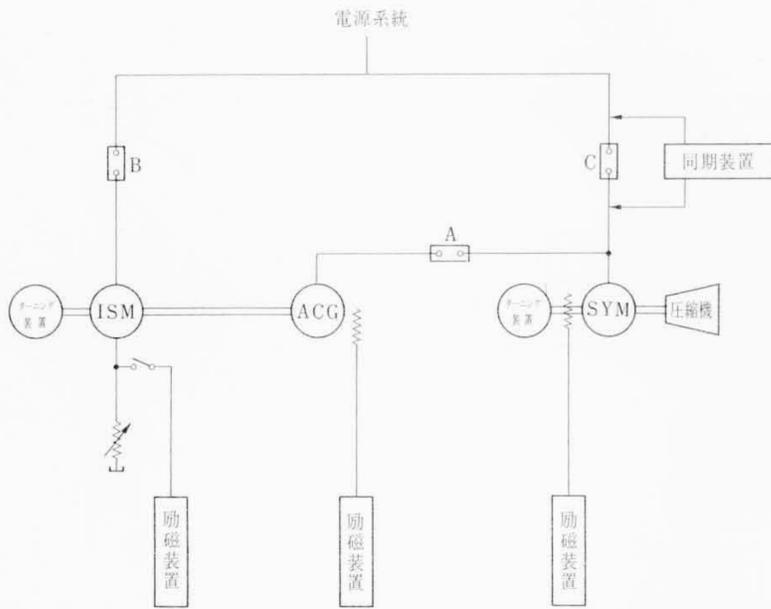


図5 低周波同期始動方式機器接続例

3. 低周波同期始動方式

この始動方式の機器接続例は図5に示すとおりで、始動順序は次に示すようになる。

- (1) しゃ断器Aを閉じ、SYMとACGを励磁し、両機をターニング速度において同期させる。
 - (2) しゃ断器Bを閉じ、ISMを二次抵抗調整により加速する。
 - (3) ISMを励磁し、系統に同期引入れを行なう。
 - (4) しゃ断器Cを投入する。この投入にあたり、しゃ断器Cの両端の電圧の大きさをAVRによって合わせ、また位相合わせをISMの励磁調整によって行なう。
 - (5) しゃ断器A、Bをしゃ断し、M-Gセットを停止する。
- これらの解析式を示すと以下ようになる。

(i) 電圧の方程式

$$E_{a1} = E_{a2} + (X \frac{d}{dt} + \gamma) i_{a1} - i_{q1} \frac{d}{dt} \theta_1 \dots\dots\dots(1)$$

$$E_{q1} = E_{q2} + (X \frac{d}{dt} + \gamma) i_{q1} + i_{d1} \frac{d}{dt} \theta_1 \dots\dots\dots(2)$$

(ii) ACG, SYMの運動方程式

$$M_1 \frac{d^2 \theta^2}{dt^2} = T_{L1} - T_{E1} \dots\dots\dots(3)$$

$$M_2 \frac{d^2 \theta^2}{dt^2} = T_{L2} - T_{E1} \dots\dots\dots(4)$$

(iii) ACG, SYMの間の電流の関係

$$i_{d2} = -i_{d1} \cos(\theta_1 - \theta_2) + i_{q1} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dots\dots\dots(5)$$

$$i_{q2} = -i_{d1} \sin(\theta_1 - \theta_2) + i_{q1} \cos(\theta_1 - \theta_2) \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

添字1：ACG側を示す。

添字2：SYM側を示す。

M：単位慣性定数

θ ：位相角

t：時間

E：内部誘起電圧

i_q ：横軸電流

i_d ：直軸電流

X：ACG, SYM, 接続線の合計等価インピーダンス

γ ：ACG, SYM, 接続線の合計等価抵抗

T_L ：機械的トルク

T_E ：電氣的トルク

(1)~(6)式を電子計算機により解いて各時刻における相電流、端子電圧、界磁電流、トルク、電力などの各量を求めることができ、

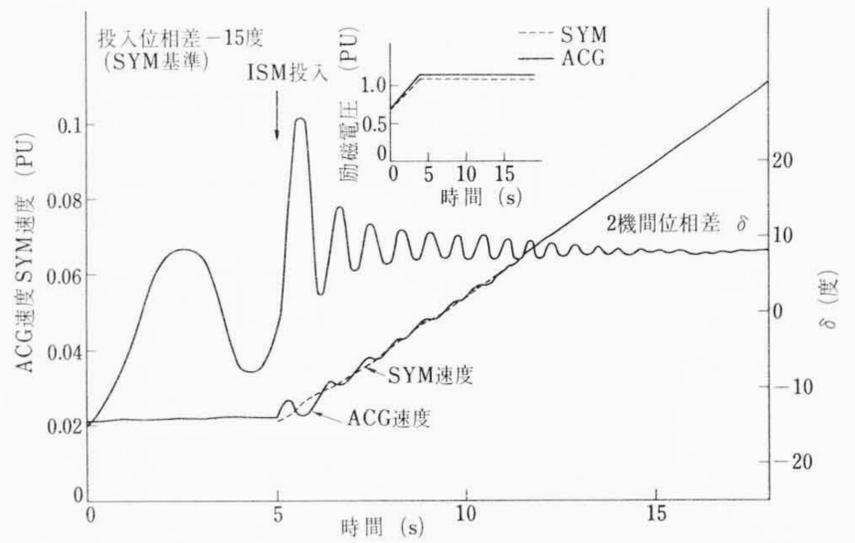


図6 16,000kW SYMターニング同期—ISM加速(計算値)

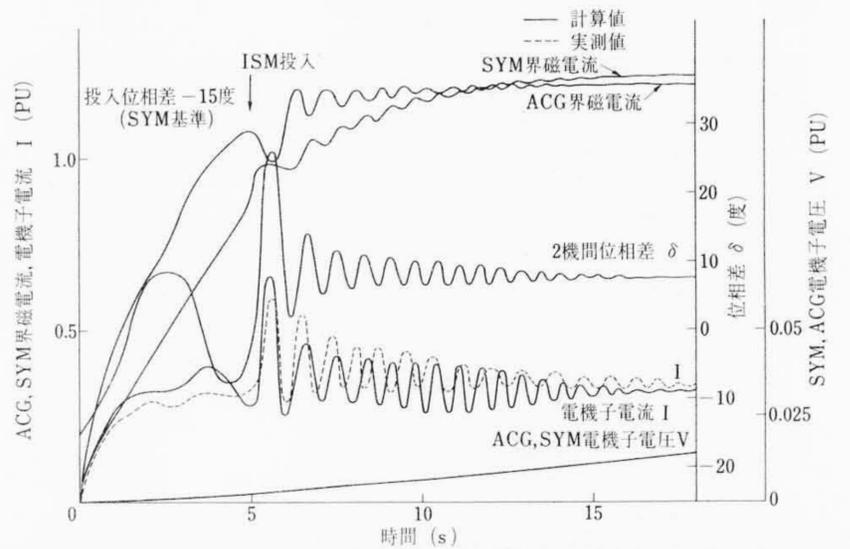


図7 16,000kW SYMターニング同期—ISM加速(計算値)

低周波同期始動の成功、失敗の判定が可能である。図6と図7はターニング同期から加速初期に至る計算および試験結果の例を示したものである。

4. 低周波同期始動実績例

日立製作所では最近共同酸素株式会社・鹿島工場に16,000kW, 6,000kW SYMおよびこれらを始動するM-Gセットを納入したので、その概要および試験結果について下記する。

表1は16,000kW, 6,000kWおよびM-Gセットの機械仕様を示したものである。なお16,000kWの場合慣性定数はM-GセットとSYM側では1：2.5であった。

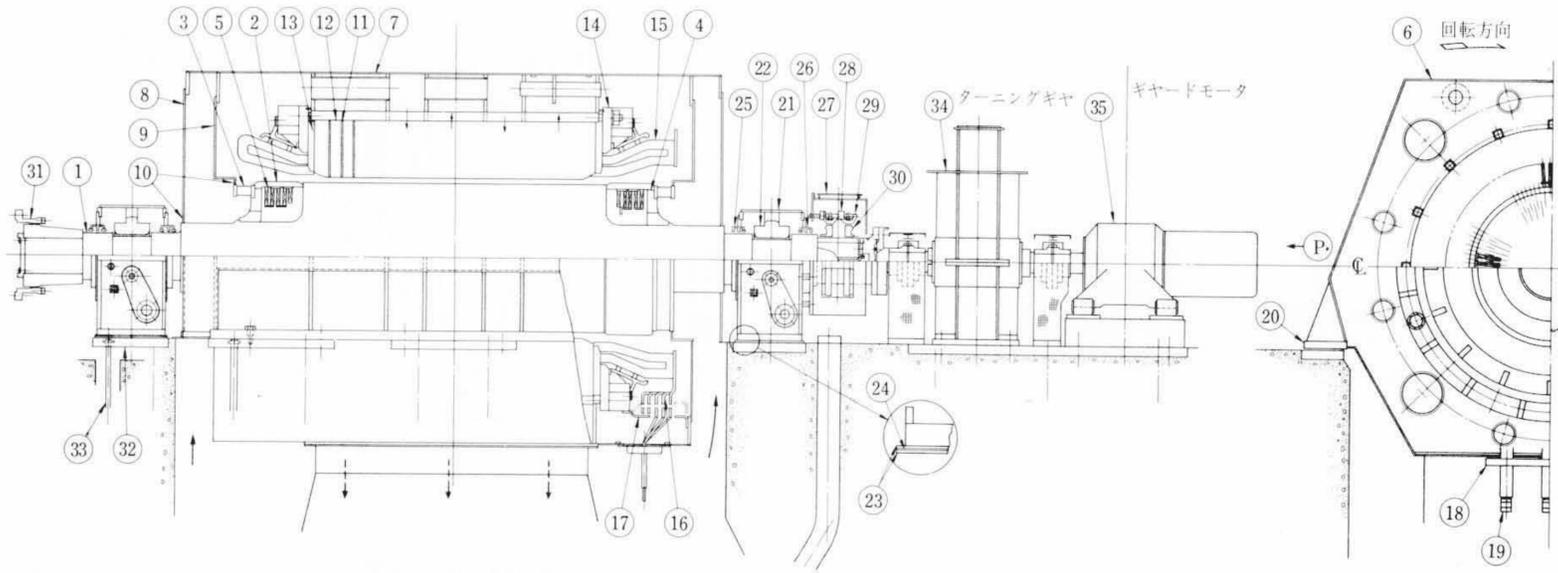
図10は今回採用した結線図である。図中近接形無接点スイッチはACG, SYMに各1個取り付けられており、SYMとACGの低速での速度、位相差、停止確認の目的で使用されており、これを利用して低周波での同期も容易にできる。

またISMは二次抵抗により加速されるが、初期始動トルクを押えるため、液体抵抗器と直列に金属抵抗器をそう入し、さらに液体抵抗器の抵抗を無段階変速させるとともに、ISMの一次電流を検出し、所定の電流値幅に制限するように液体抵抗器のコントロールモータを間欠運転させる制御を併用して加速を円滑にし、加速途中の同期はずれがないようにしてある。またACGを停止させる場合にはISMに発電制動をかけて停止時間を短縮している。

図11は主要部分のフローチャートを示したもので、器具番号は図10のスケルトンダイアグラムと同じである。

操作系統は図12に示すとおりである。本図では現場、中央のいずれでも操作できるシーケンスとなっている。

SYM { 現場……………各操作を個別に行なう。
 中央……………ワンタッチ運転にてすべてシーケンスコン



番号	部品名	番号	部品名	番号	部品名	番号	部品名
1	同期電動機回転子	10	エアデフレクタ	19	口出線	28	ブスリング
2	リテーニングリング	11	同期電動機固定子鉄心通風ダクト	20	同期電動機固定子ライナ	29	カーボンブラシ
3	ファン	12	同期電動機固定子鉄心	21	軸受台	30	コレクタリング
4	センタリングリング	13	同期電動機固定子鉄心エンドダクト	22	軸受	31	ギヤカップリング
5	同期電動機回転子コイル	14	ステータクランピング	23	軸受台絶縁板	32	基礎板
6	同期電動機固定子わく	15	同期電動機固定子コイル	24	軸受台ライナ	33	基礎ボルト
7	通風管	16	同期電動機固定子コイル接続線	25	内側オイルデフレクタ	34	ターニングギヤ
8	エンドカバー	17	同期電動機固定子コイル接続線支え	26	外側オイルデフレクタ	35	ギヤードモータ
9	ファンガイド	18	ターミナルプレート	27	コレクタリングカバー		

図8 16,000kW SYM構造断面図

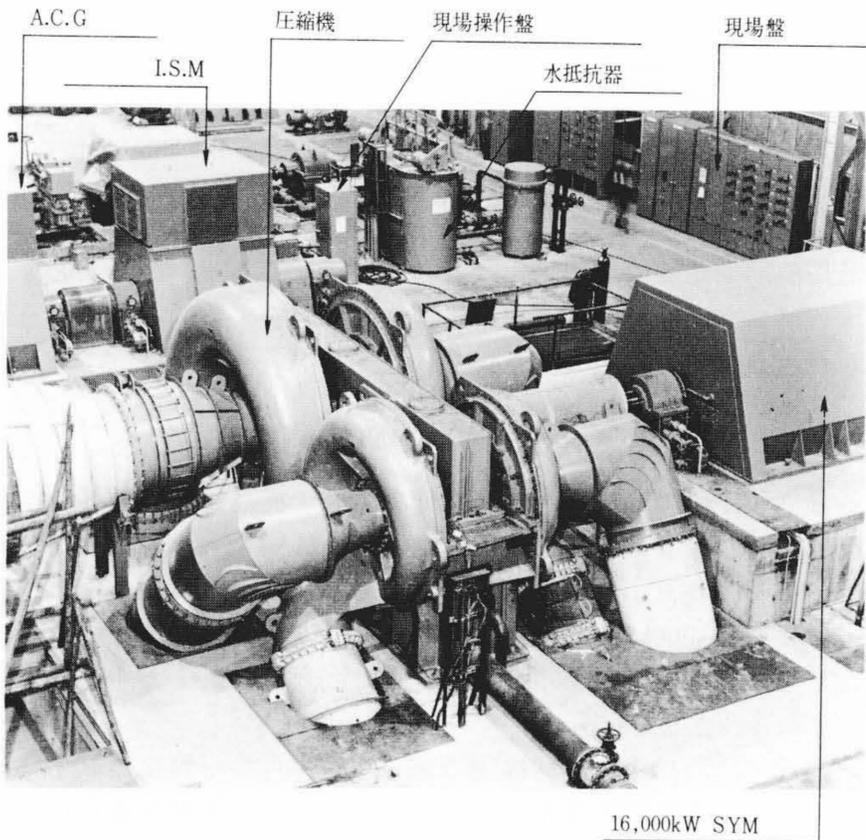
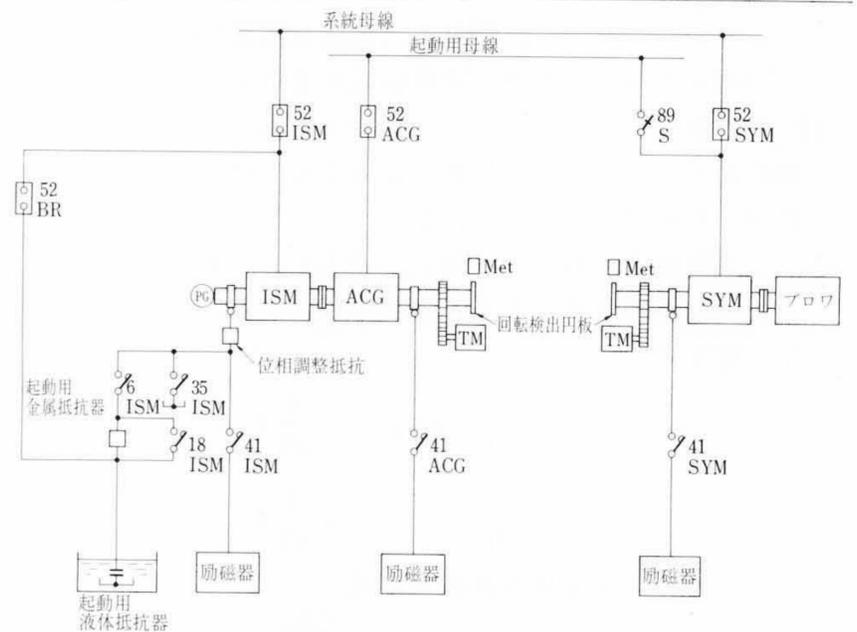


図9 現地据付状態



記号	説明	記号	説明
ISM	誘導同期電動機	52BR	交流しゃ断器(制動用)
ACG	始動用交流発電機	89S	断路器(始動電源用)
SYM	同期電動機	6ISM	交流接触器(始動抵抗器用)
PG	回転速度発電機	18ISM	"(加速用)
TM	ターニングギヤモータ	35ISM	交流接触器(ISM二次短絡用)
Met	近接形無接点スイッチ	41ISM	界磁接触器(ISM用)
52ISM	交流しゃ断器(ISM用)	41ACG	"(ACG用)
52ACG	"(始動電源用)	41SYM	界磁接触器(SYM用)
52SYM	交流しゃ断器(SYM系統用)		

図10 低周波同期始動スケルトンダイヤグラム

表1 機械仕様一覧

名称	主電動機	主電動機	始動用発電機	始動用電動機
用途	原料空気圧縮機用	酸素圧縮機用		
出力	16,000kW	6,000kW	5,000kVA	5,100kW
形式	全閉空気冷却器付塊状磁極回転界磁形同期電動機(円筒形)	全閉空気冷却器付同期電動機(突極形)	全閉回転界磁形同期発電機(突極形)	開放防滴形誘導同期電動機
極数	4	4	6	6
回転数 (rpm)	1,500	1,500	1,000	1,000
電圧 (V)	11,000	11,000	11,000	11,000
周波数 (Hz)	50	50	50	50
力率	1	1	1	1
絶縁	B種	B種	B種	B種

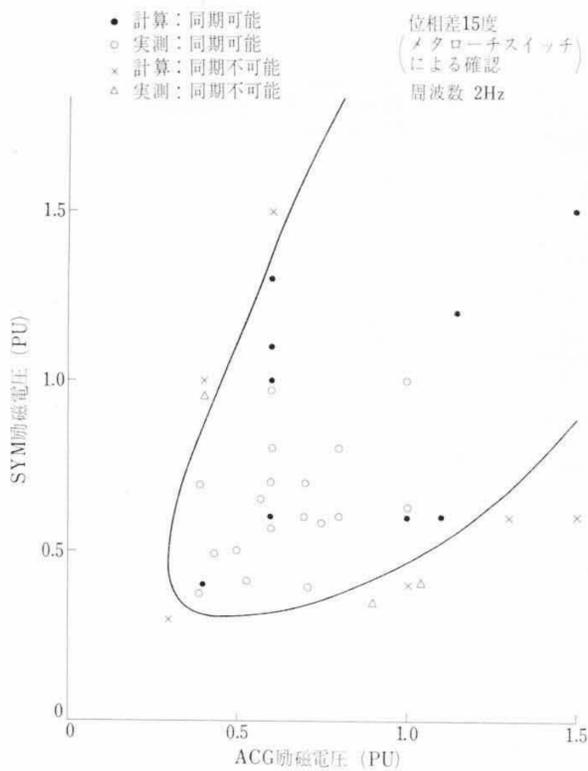


図14 16,000kW SYMの励磁量と低周波同期可能域の関係(ISM加速含まず)

次に共同酸素株式会社・鹿島工場に納入した実機の計算結果、試験結果を示す。図14に示された励磁量と低周波同期可能域の関係によれば、計算値と実測値がよく一致しているのがわかる。16,000kW SYM始動の場合のターニング同期の実測例は図15のようにメタローチスイッチで位相を確認してターニング同期を開始するので数秒後完全に同期する。図16の加速時の実測例でも加速はスムーズであり図中のISM電圧(二系統の電圧)は全く変動が見られない。SYMを系統に投入するまでに要する時間は現在約3分であり、計算値とよく一致している。

5. 低周波同期始動の問題点

次に低周波同期始動の設計において問題となる点をあげ、その対策について述べる。

(1) SYMとACGの励磁量

両機の励磁量の差が大きい場合、低速では両機電機子間に無効電流が流れ同期困難となる。その傾向は図14における16,000kWの場合でもわかる。このため、励磁電圧のPU値をほぼ等しくし、かつ抵抗の温度変化に対しても同期可能であって、かつISM加速時の同期化力が十分取れるような励磁電圧にプリセットしておく必要がある。今回の励磁調整においても図6に示すような励磁調整を行なった。

(2) ACGとSYM間の線路抵抗

低周波同期始動においては、両機を接続する線路の抵抗損失が問題となり、解析結果によれば、一般的には回路抵抗の全抵抗が2%以下なら問題ないと考えられる。

(3) SYM, M-Gセット, 負荷の反抗トルク特性, 慣性定数

反抗トルクは低周波同期始動において最も重要な問題であり、この値によりM-Gセットの容量が決定されるため、計画の時点で十分検討すべきである。

またM-GセットとSYM, 負荷の慣性定数の差が大きい場合、一般に慣性定数の小さいACGにおいてSYMとの間の位相差が大きくなりスイングするのを防ぐため両機の励磁電流を大きくし、同期化力を大きくすることも有効である。今回の場合、単位慣性定数はあまり差がなく、図15, 図16に示すようになら問題がなかった。

(4) M-Gセットの出力

M-GセットでSYMを最高速度まで上昇させた後、ISMをIM

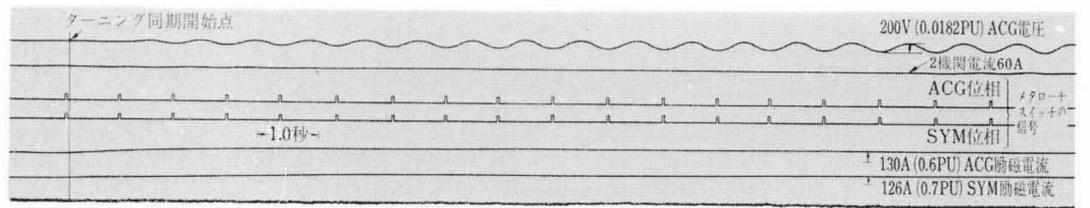


図15 16,000kW SYMターニング同期試験実測値

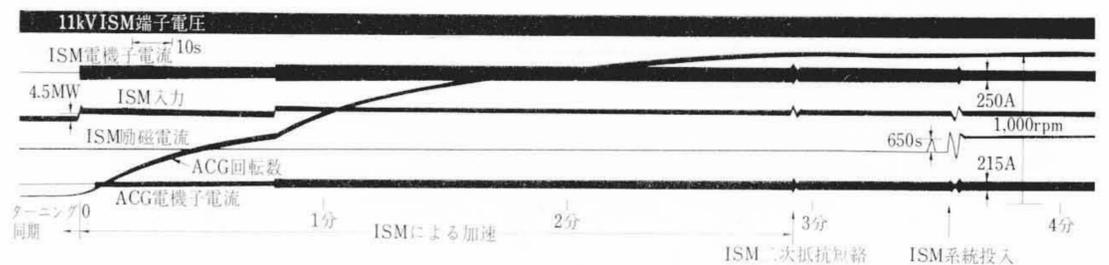


図16 16,000kW SYM加速試験実測値

運転からSYM運転に切り換える。この時点でISMは系統に対し非同期運転を行なうことになり、系統に与える影響を小さくするため、ISMの容量を十分にとり、ISMのすべりをできる限り小さくする必要がある。本機においては図16のようにISMを系統に投入した時点でISMの電圧が全く変化しておらず、ISMの容量が十分であったことがわかる。

(5) ACGと系統の電圧位相差

ISMを系統と同期させた後、系統とSYMの電圧の大きさと位相を合わせて同期させる必要がある。この位相調整対策として、ステータ転動装置を用いる方式と、ISMとACGを必要角度だけずらしてカップリングする方式がある。前者は転動装置の保守点検がめんどうであり、また一度セットした後は動かす必要がない場合が多い。それに対し後者は保守が容易で微調整としてISMの励磁調整のみにより行なうという利点があり、日立製作所においては後者を採用し4,000kW, 6,000kW, 16,000kWを始動しているが、系統に与える影響を最小限にとどめて投入していることが図16などにより明らかである。

6. 結 言

最近の産業、特に製鉄、化学などにおいてブロワやコンプレッサ用として要求される電動機の容量は大容量化しつつある。製作の点あるいは信頼性の点からも高速大容量電動機では同期電動機が最適と考えられている。今回の16,000kW, 1,500rpm 円筒回転子形同期電動機の完成および低周波同期始動をはじめとする現地の好調な運転結果により、今後の高速大容量同期電動機の基礎は築かれたと考えられ、日立製作所では今後さらにその進展に努力する所存である。

最後に本始動方式を採用するにあたり種々ご検討いただいた住友金属工業株式会社・鹿島建設本部および共同酸素株式会社・鹿島工場の関係各位に対し深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) Concordia : Synchronous Machine
- (2) 庄山：発電電動機の同期始動 日立評論 49, 69 (昭42-6)
- (3) 北野, 鈴木：水殿発電所の同期始動方式 (電気四学会連合大会 昭45-465)
- (4) 伊佐早, 堀尾ほか：高炉送風機の新しい駆動方式 (火力発電 昭45-2)
- (5) 有働, 小向：低周波同期起動特性のアナログ計算機による解析 (電気四学会連合大会 昭44-369)