世界最大級のアルミ電解用整流設備

特集

武藤　和弘（むとう　かずひろ）　西條　学（さいじょう　まなぶ）　森山　琴也（もりやま　きんや）

1　まえがき

輸送機械業界を中心に部材の軽量化のため，アルミニウム（アルミ）の需要は，ここ数年間年率平均5％で拡大している。アルミは，周知のとおりアルミナを電気分解することにより生産されるが，その際に多大な直流電力を必要とする。このため，アルミ電解炉メーカーはその消費電力を低減することに日々研究を重ねており，最近では**表1**に示すとおり600 MW級の電解炉設備が実用化され，さらに大型化される傾向にある。その直流電力を供給するための変圧整流器も単器の大電流化とさらなる高効率化が要求されている。富士電機では，1960年以来，電解用変圧整流器（以下，Sフォーマという）を技術開発・改良を加えながら製作し続けており，その最先端の高効率・高信頼性のSフォーマは，世界中のユーザーから大きな評価を得ている。このたび，アルコア社の新鋭アイスランド製錬所に世界最大級のダイオードSフォーマ設備を納入したので，その技術内容を紹介する。

2　全体システムの概要

このSフォーマはDC1,580 V，365 kA，576.7 MWであり，世界最大級のアルミ電解用電源である。このクラスのSフォーマは従来6台で構成されていたが，コストを下げるため単器容量を従来の1.25倍にアップし，5台構成とした。このうち1台は予備器であるが，運転時の電力ロスを下げるため常時5台で運転される。Sフォーマは電圧調整用変圧器，整流器用変圧器およびダイオード整流器で構成されている。これらの仕様を**表2**に示す。電源システムとSフォーマの構成を**図1**に，変圧器と整流器の工場組合せ試験時の写真を**図2**に示す。

本システムの主な特長は次のとおりである。

(1)　ランニングコストを最小限に抑えるべく，従来にない超高効率（99％）設計とした。

(2)　厳しい高調波規制をクリアするため60相整流方式とし，さらにインピーダンスを最適化して電圧調整用変圧器三次側に高調波フィルタを設置した。

(3)　220 kVから電圧調整用変圧器と整流器用変圧器により，1,394 V（DC1,580 V出力に相当）へ直接降圧し，中間電圧に降圧するための受電変圧器を省略した。

(4)　107タップの負荷時タップ切換器と電圧調整用リアクトルの組合せにより出力電圧をDC0 Vから1,580 Vまで無瞬断で連続調整することができる。

表1　アルミ電解炉の要求電気仕様

	1960年代	1990年～現在	将　来
直流電圧	500 V	1,250～1,580 V	1,650 V ～
直流電流	50～120 kA	315～365 kA	400 kA ～
直流電力	25～60 MW	393～577 MW	660 MW ～

表2　アイスランド向けSフォーマの単器仕様

台　　数	5台
変圧器一次電圧	AC220 kV，三相，50 Hz
変圧器二次電圧	0 V～R1,394 V～F1,539 V
変圧器三次電圧	33 kV
変圧器容量	173.9 MVA
変圧器タップ数	107タップ
変圧器冷却方式	導油風冷式（ODAF）
直流電圧	DC 0～1,580 V
直流出力電流	0～91.3 kA
定格の種類	100％連続，150％，1分
電力変換方式	三相ブリッジ接続×4群（単器12相整流）
使用整流素子	5 kV，3.5 kA，ダイオード
ダイオード構成	1S10P6A4G（1P冗長あり）
整流器冷却方式	送水風冷式（WFAF）不凍液閉鎖循環方式
周囲温度	−30～+40℃

3　変圧器

変圧器は，電圧調整用変圧器と整流器用変圧器から構成

武藤　和弘

産業用大容量変換装置のプラントエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部パワエレシステム技術部。

西條　学

変圧器の設計・開発に従事。現在，株式会社日本AEパワーシステムズ変圧器事業部設計部技師。

森山　琴也

整流器の設計・開発に従事。現在，株式会社日本AEパワーシステムズ変圧器事業部変換装置部。

図1　電源システムとSフォーマの構成

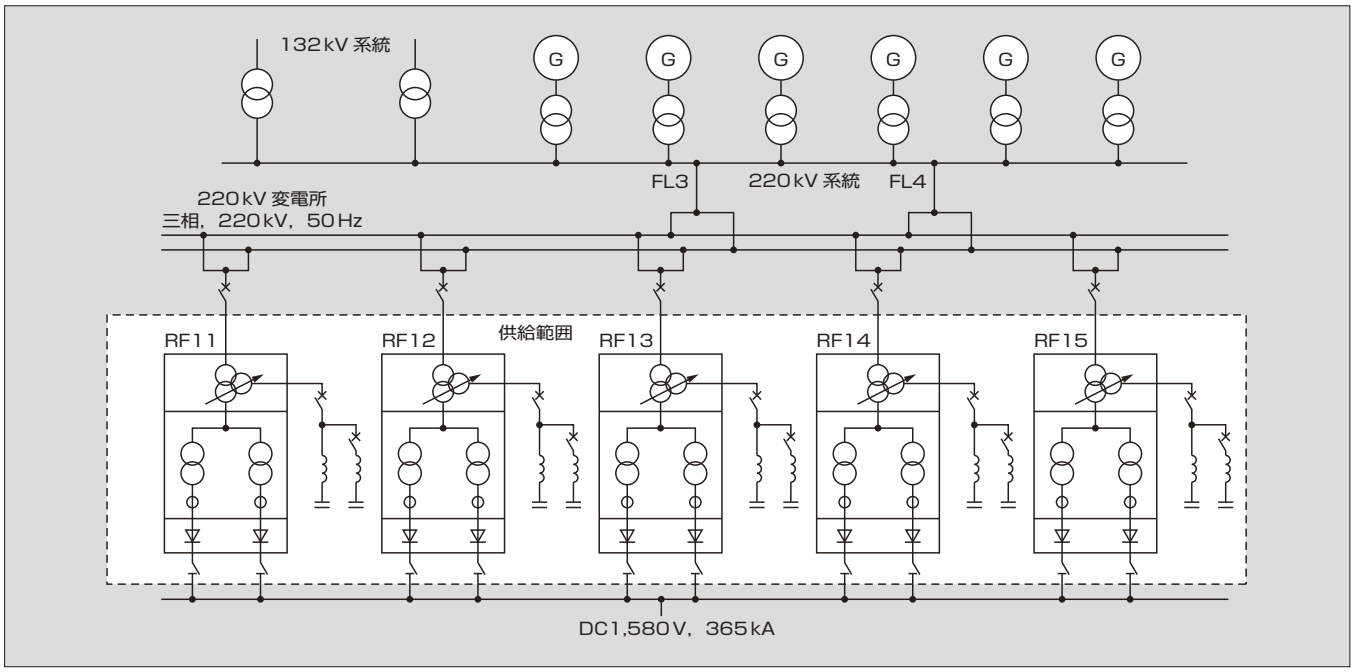


図2　工場組合せ試験時の写真

され，アルミ電解用としては世界最大級の容量を持つ。さらに以下に示す多くの特長を持つ。

3.1　超低損失・高効率・低騒音

超低損失・高効率・低騒音は，

(1)　高性能方向性けい素鋼板の採用

(2)　電流密度の低減

(3)　渦電流損の小さい巻線の採用

(4)　厳密な磁界解析に基づくタンク磁気遮へい板の採用

によって，このクラスの変圧器（電圧調整用変圧器に分離巻線を採用）としては，従来にない低損失・高効率を実現した。**表3**に，この変圧器の効率比較を示す。

また，超低損失・高効率とあわせて，励磁騒音およびインピーダンス騒音ともに，ステップラップ接合方式や磁束密度の最適化などの中身構造および外部構造の適正化により，組合せ時における励磁騒音とインピーダンス騒音の合成で75dBという低騒音を実現した。

表3　変圧器の効率比較

	電圧調整用変圧器	整流器用変圧器
今回実現した効率（%）	99.7	99.7
通常損失での効率（%）	99.4	99.3

3.2　分離巻線方式電圧調整用変圧器

通常，電圧調整用変圧器は比較的小さい巻数比のため，より経済的な単巻変圧器が用いられることが多い。しかし，今回は電圧調整用変圧器三次側に高調波フィルタを設置し高調波を低減させるため，運用範囲の各タップにおける三次巻線分離インピーダンスの変動を極力抑える必要があった。そのため，分離巻線方式の電圧調整用変圧器を採用した。

図3に分離巻線方式での各タップのインピーダンス変化例，**図4**に単巻方式での各タップのインピーダンス変化例を示す。両図の破線に示すとおり，分離巻線方式のほうが三次巻線分離インピーダンスの変動を小さくできることが分かる。

3.3　負荷時タップ切換器

これまで0～100%の電圧調整は，3～4タップの無電圧タップ切換器（NVTC）と35タップ程度の負荷時タップ切換器（OLTC）を組み合わせて実現していた。そのためNVTCを切り換える際に電源を一度開路する必要があり，再投入時に励磁突入電流が発生していた。

今回の設計では107タップのOLTCを採用し，NVTCを用いることなく電圧切換をスムーズに行うことができる。そのため0～100%の電圧調整を無瞬断で実現することができ，励磁突入電流の影響を軽減することが可能となった。107タップを実現するため，**図5**に示すように複数の

粗タップ（6 セクション）と一つの密タップ（18 セクション）を持つ結線を採用している。

3. 4　解析技術

今回の電圧調整用変圧器は受電電圧が 220 kV であり，産業用の変圧器としては最高クラスであることおよびその中間電圧が高いことから，一次巻線および中間電圧巻線の絶縁技術が非常に重要になってくる。特に中間電圧巻線は，通常の変圧器と比較すると，**図 5** の結線図に示すとおり 107 タップを実現するために複数の粗タップと一つの密タップから構成されており，非常に多くの端子がある。このため中間電圧巻線の絶縁について，印加端だけではなく各端子における電位分布・電界分布を正確に把握することが必要である。以下，解析結果の代表例について紹介する。

(1)　各端子の電位振動解析

変圧器巻線をインダクタンス・キャパシタンスの電気的な等価回路にし，それに付け加え巻線導体や鉄心渦電流損や誘電体損失などの減衰分を考慮した自社開発のプログラムにより電位振動のシミュレーションを実施した。

シミュレーションの内容は，220 kV 側から印加したときの各端子の電位分布・中間電圧端子への移行電圧および中間電圧端子から印加したときの電位分布である。その代表例として，**図 6** に中間電圧端子から印加したときの結線モデル，**図 7** に印加波形，**図 8** に A24 端子－大地間，**図 9** に A23 端子－大地間の発生電位を示す。

なお，巻線製作工程完了時にアナライザ測定を実施し，

図 3　分離巻線変圧器のインピーダンス変化例

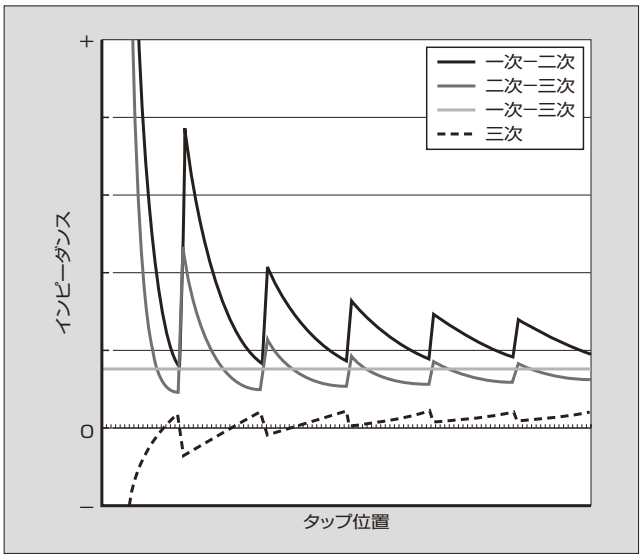


図 4　単巻線変圧器のインピーダンス変化例

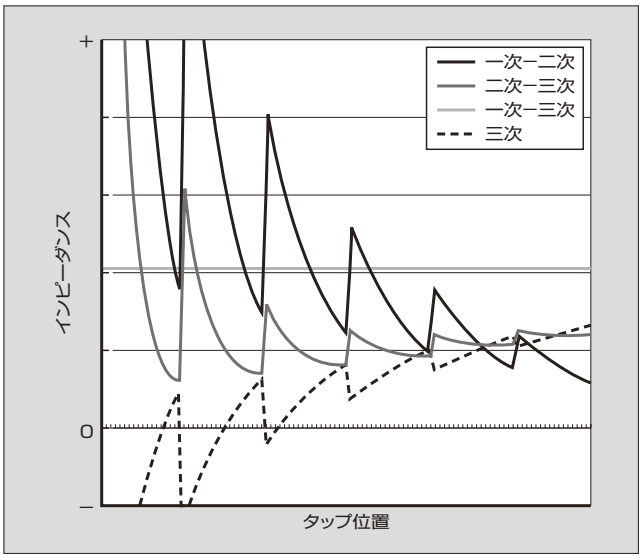


図 5　電圧調整用変圧器の結線図

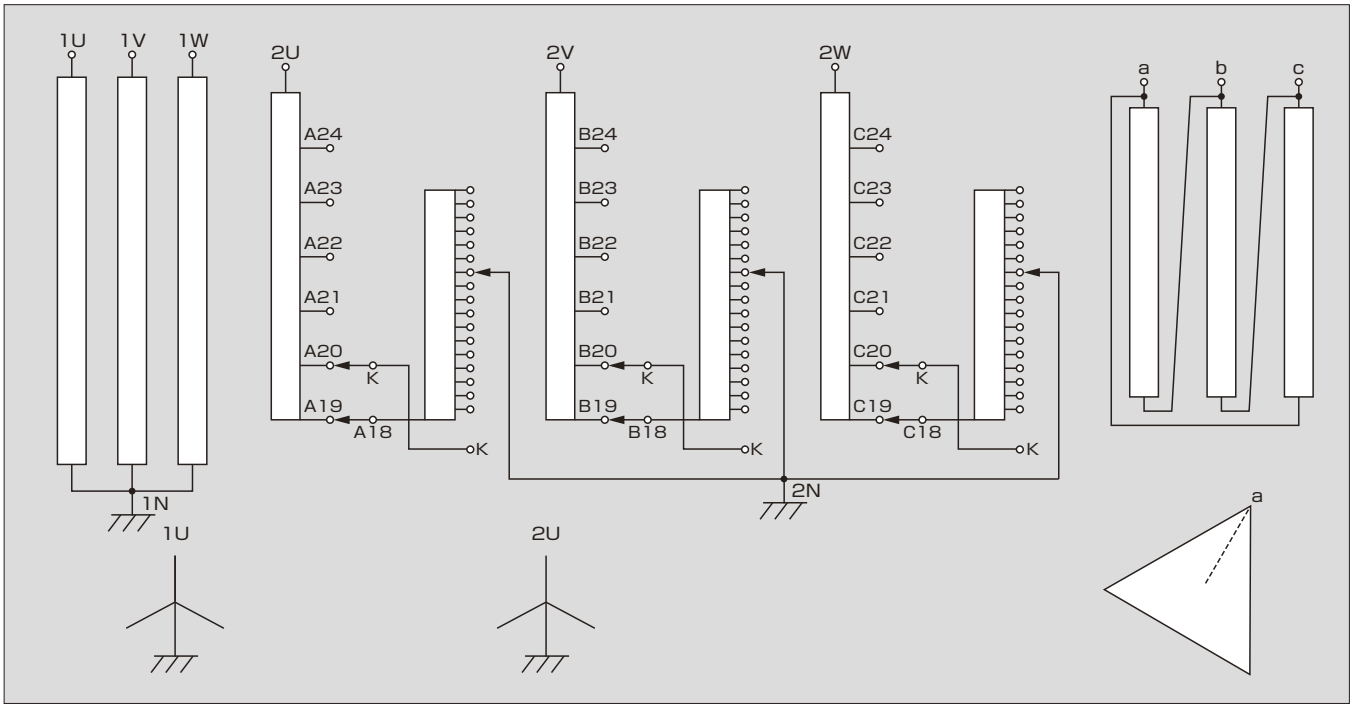


図 6　中間電圧端子から印加する結線モデル

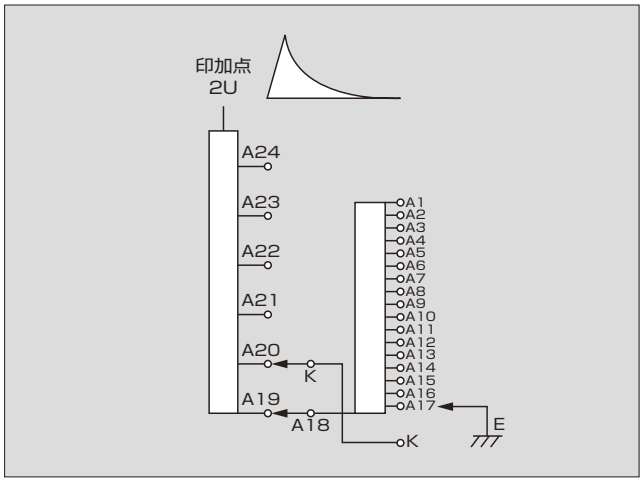


図 7　2U 端子－大地間の発生電位（印加波形）

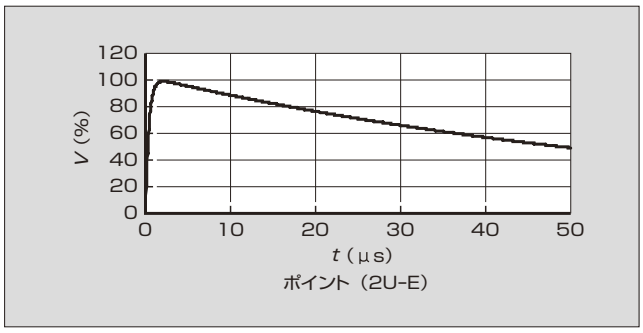
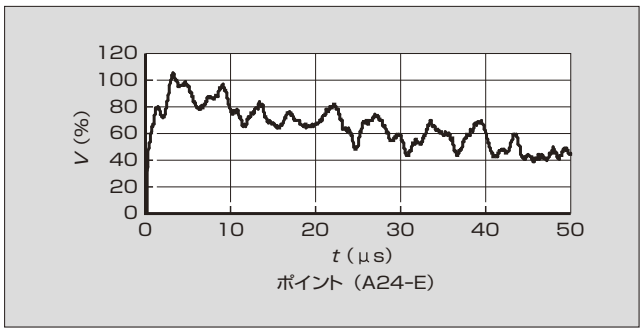


図 8　A24 端子－大地間の発生電位



シミュレーション結果と実測値がほぼ合っていることを確認した。

(2)　電界解析

有限要素法で計算する自社開発のプログラムにより，上記電位振動解析結果に基づいた各端子の電位を入力とし，各巻線部の電界強度をシミュレーションした。代表例として**図10**に一次巻線とタップ巻線間の電界分布を示す。一次巻線－タップ巻線間だけでなく，各端子間の電界強度をシミュレーションし，各部の電界強度が許容値以下であることを確認している。

上記に加え，各タップでの磁界分布解析，インピーダンスの計算，機械的強度の計算および渦電流損の計算を行い，その結果を考慮した電圧調整用変圧器の最適設計を実施した。

図 9　A23 端子－大地間の発生電位

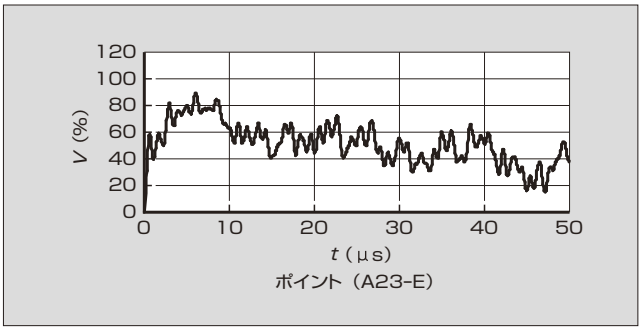
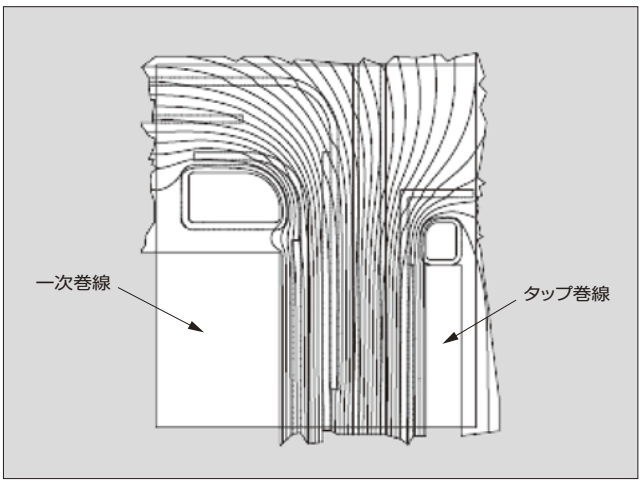


図 10　一次巻線とタップ巻線間の電界分布



3.5　光ファイバ温度センサ

電圧調整用変圧器および整流器用変圧器の巻線内に光ファイバ温度センサを設置している。従来，巻線温度は温度上昇試験時に電気抵抗法により平均温度を測定し，最高温度は計算により求めていたが，この温度センサにより，巻線内の最高温度を直接的に測定することができる。これにより，今までは計算でしか求められなかった最高点温度を直接測定でき，変圧器の運用状態の監視がより正確にできるようになっている。

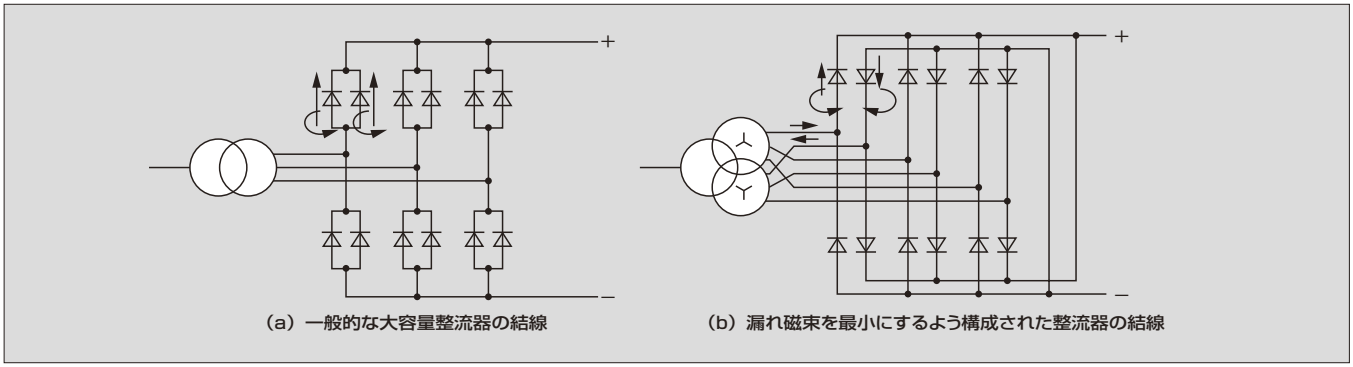
4　整流器

整流器の仕様は**表 2** のとおり，直流出力の電圧・電流が最大級であることに加え，寒冷地などの特殊条件も加わっている。以下にそれらを達成するために行った技術について述べる。

4.1　大電流による漏れ磁束の抑制

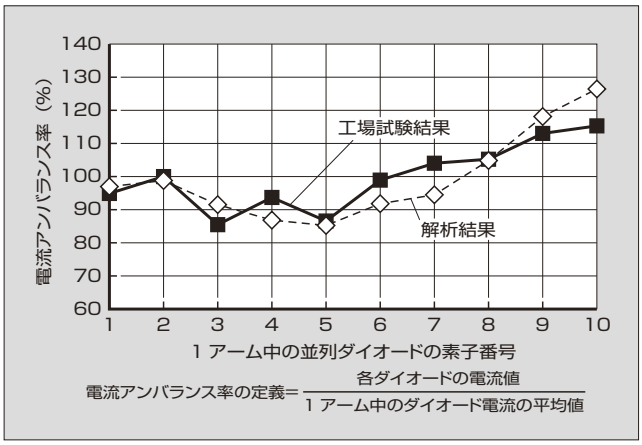
大電流の整流器であるため，磁束による周囲金属の局部過熱対策は重要な課題である。富士電機の整流器では，変圧器二次リードから整流器の直流集電部までの漏れ磁束を最少化させる同相逆並列接続という独自技術を適用している。**図11**にこの接続の比較概念図を示す。これは電気回路的にまったく同じ二組の整流器を物理的に表裏一体で近

図 11　一般的な大容量整流器の結線と同相逆並列結線（概念図）



（a）一般的な大容量整流器の結線　（b）漏れ磁束を最小にするよう構成された整流器の結線

図 12　並列ダイオード間の電流アンバランスの解析と工場試験結果



接配置し，それぞれの電流を逆の方向とすることで発生する磁束を打ち消す技術である。

これにより，

(1)　強度・経済性に優れた鉄製のキュービクルの適用

(2)　並列ダイオード間の電流アンバランスの原因となるインダクタンスの低減

が可能である。

4. 2　並列ダイオード間の電流アンバランスの解析と並列数の決定

本装置では後述する寒冷地対策のため，従来の純水に替え冷媒に不凍液を適用している。そのためダイオードの冷却効率が低下していることに加え，装置自体の定格電流も増加していることにより，従来は最大 8 並列であったダイオードの並列数をさらに増やす必要があった。

一方，並列ダイオード間には物理的な構成上生じるインダクタンスの違いと個々のダイオード特性の違いにより電流のアンバランスが生じるため，並列数の算出はこのアンバランスも考慮して決定しなければならない。

製品設計にあたって，それら二つの条件を考慮した数値解析[1]を実施し，電流アンバランス率の最大値を評価した。その結果，特にリアクトルなどの電流バランス調整部品を具備することなく，電流アンバランスを ± 30 % 以内に収めることが可能であることを確認し並列数を 10 と決定した。

図 12 に解析結果と工場試験時における実測結果を示す。工場試験結果は，解析結果とよく一致し，かつその解析で求められたアンバランスの範囲内に収まっていることを確認した。

4. 3　導体の振動対策

並列数が 10 となったことでダイオード実装部のバスバーは従来に比べ約 16 % 長くなり，電流自体も従来より増えているため，装置の運転振動による周辺取付け部品への影響を確認する必要が生じた。そこでデジタルシミュレーションによる振動解析を実施した。

解析は，①回路全体の振動解析を実施して対策が必要な箇所のめどをつける，②さらにその箇所をモード解析することによって振動成分の詳細解析と強化対策の検討を実施する，という手順で実施し，最終的には工場試験時に実際の振動を確認した。

デジタルシミュレーションによる整流器主回路全体の計算モデルを**図 13** に，その振動解析結果を**図 14** に示す。**図 14** から，振動箇所は各相を連結している直流側の集電導体が大きくなっており，対策が必要であることが分かった。このため直流集電導体のモード解析を実施し，振動の応答特性の解析と補強箇所の最適性の評価を行った。モード解析モデルを**図 15** に，その解析結果を**図 16** に示す。補強により 100 Hz の点で 1/4 以下に振動が低減しており，さらに電源周波数（50 Hz）の倍波長に対する応答も低減している。

これらの効果を確認するため，最終的には工場試験時において補強前後の条件で振動を測定した。製品の工場試験時における運転振動の測定結果を**図 17** に示す。補強対策は基本周波数から 250 Hz までの倍波長に対して効果があり，周辺部品に対する要求仕様（1.0 G 以下）を満たすとともに，最大でも 0.6 G 以下に抑えられることを確認した。

4. 4　低温対策

整流器の導体や冷却体は純水によって直接冷却するが，今回は周囲温度が − 30 ℃ ～ + 40 ℃ という広範囲の仕様であるため，高温での冷却効率を確保する一方で，低温での凍結対策を行わなければならない。そのような場合，従来は冷媒としてエチレングリコール水溶液を適用していたが，

今回は環境への影響を配慮し，食品の添加物としても使用されるプロピレングリコール水溶液を採用した。

特にプロピレングリコールはエチレングリコールに比べて低温での粘性が高いため，粘性による冷媒流量の変化を考慮した計測機器の設定を実施するとともに，粘性が高くても始動が可能であるポンプの仕様や配管設計を考慮している。

4.5　工場組合せ試験

前述のさまざまな課題を検証することおよび機器総合効率を評価するためには，変圧器と整流器の組合せ試験を行うことが必要である。組合せ試験を現地で行うことは，試験用電源や工場と同じ高精度の測定器を用意しなければならず，現実的とは言い難い。富士電機では，Sフォーマの組合せ試験を実施しており，顧客立会い試験もこの状態で実施した。今回の組合せ試験では，電圧調整用変圧器と整流器用変圧器，ダイオード整流器を，製作工場にて実際と同じ状態で接続・組み合わせて短絡試験を行い，電力損失・各部温度上昇・騒音を測定して，所定の要求性能が得られることを確認した。なお，短絡試験のため変圧器の無負荷損は発生しないので，別途測定した無負荷損を計算で補正している。

図13　振動解析モデル

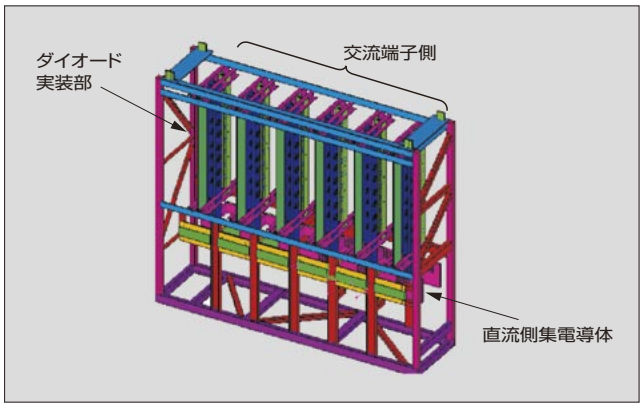
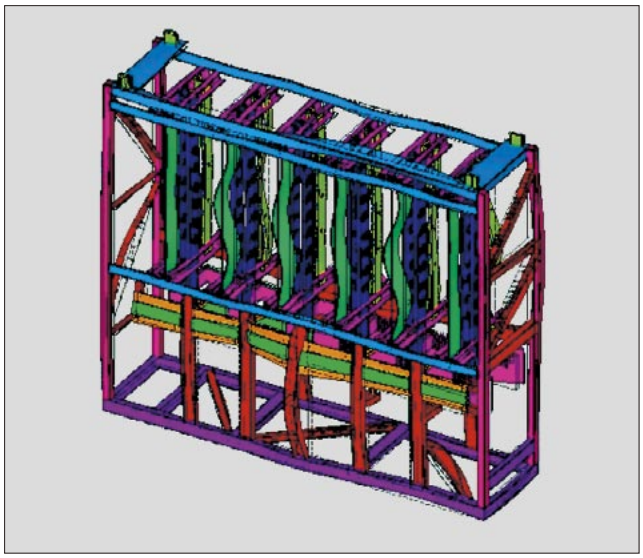


図14　振動解析結果



5　高調波と力率

Sフォーマ設備から電源側へ流出する高調波は，IEEE 519の規制値を満足している。その規制値を**表4**に示す。大容量整流設備においては高調波の低減と力率の改善は大きな課題である。アルミ電解設備の場合は，下記の条件

図15　モード解析モデル

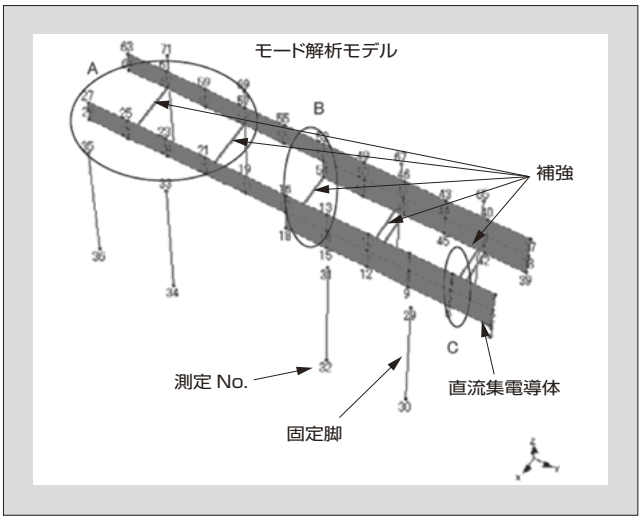


図16　モード解析による補強の効果の検討結果

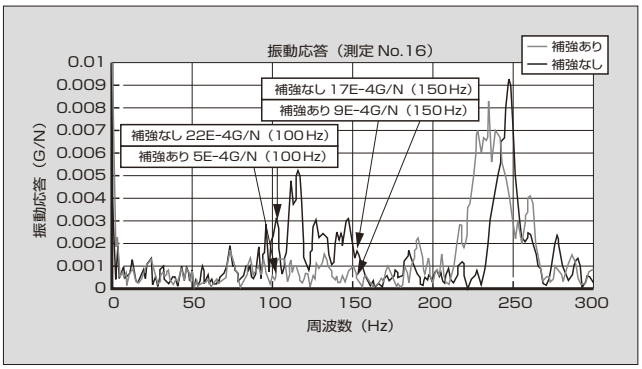
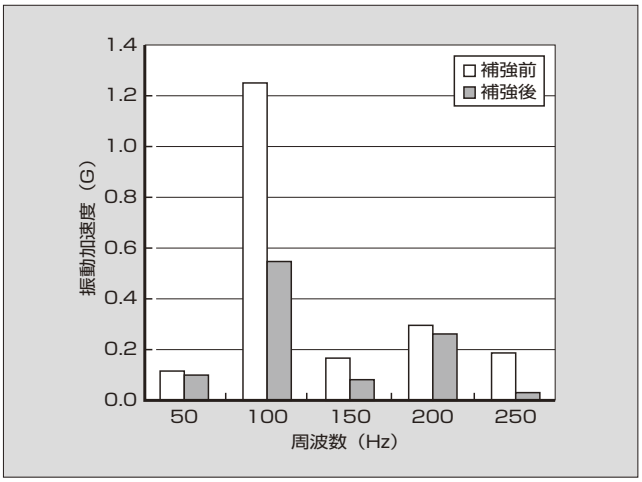


図17　製品の工場試験時における運転振動の測定結果



を踏まえ，高調波フィルタ（力率改善を兼ねる）の設置場所・構成を検討しなければならない。

(1)　電源の高調波インピーダンスの影響を極力受けないようにする。

(2)　アルミ電解設備は1時間以上の停電は絶対に許されないため，高調波フィルタにおいても予備器が不可欠である。

(3)　負荷の大きさに従って力率をある程度調整可能にする。

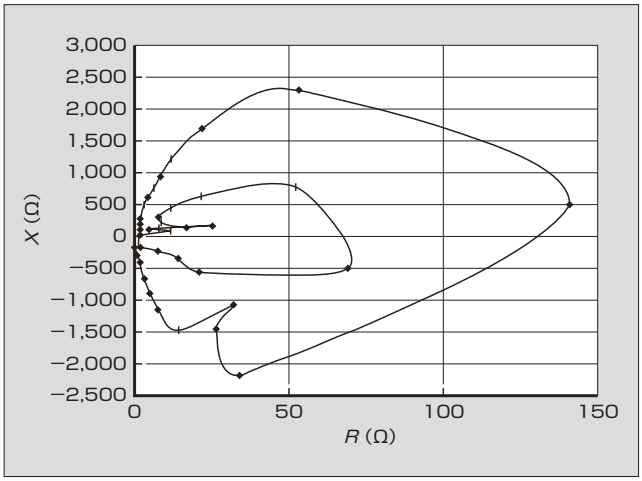
5.1　電源高調波インピーダンスの解析

220 kV 電源設備は**図1**に示すとおり，6台の115 MW水力発電設備と132 kV系統に接続されている2台の75 MVA変圧器から構成されている。電解工場には電源設備から2回線で送電されている。今回の計画は発電設備も新設することになっており，電源設備の運用上その容量と負荷容量がおおむね1：1の関係にある。電源短絡容量はスタートアップ時370 MVA，定常時1,300 MVA，最大時2,300 MVAと変化する。このため，220 kV系統の運用条件，発電機のインピーダンス，変電設備のインピーダンス，送電線のインピーダンス，132 kV系統条件を考慮し，電源高調波インピーダンスの解析を実施した。高調波インピーダンスは電源設備の運用を考慮して，基本波から50次までの抵抗分とリアクタンス分を**図18**のとおりルーカスインピーダンス（一例）で表し，次節で紹介する高調波フィルタの設計条件とした。

表4　IEEE 519-1992 Harmonic Current Limits for Non-Linear Loads at Point of Common Coupling (PCC) for Voltage＞161 kV

I_{SC}/I_L	Maximum Harmonic Current Distortion for Individual Odd Harmonic Order (Percent of I_L)					
	＜11	11≦h≦17	17≦h≦23	23≦h≦35	35≦h	TDD
＜50	2.0	1.0	0.75	0.30	0.15	2.5

図18　220 kV系統ルーカスインピーダンス（一例）



5.2　高調波フィルタの構成

前述の条件から各電圧調整用変圧器を分離巻線方式とし三次巻線を設けて，**図1**に示したとおりおのおのに高調波フィルタを設置するシステム構成とした。これにより5台中1台の高調波フィルタは予備器とすることができる。このシステムは変圧器単体としてはコストが高くなるが，高調波フィルタを含めたシステム全体を考慮すると，経済的であることと運用的にも自由度が高い。ただし，整流器から発生する高調波を吸収するためには，電圧調整用変圧器の一次側分離インピーダンスを大きくしながら三次巻線分離インピーダンスをできるだけゼロにすることが必要である。さらにこれらのインピーダンスは，タップの位置にかかわらず一定にすることが望ましく，巻線の配置や高さ・幅をそれぞれ調整することによって，三次巻線分離インピーダンスの変動が最小となる構成を実現している。

高調波フィルタの構成は，2，3，4，5，7，11次の計6分路構成としている。運転時において，2，3，4次フィルタは，電源側への高調波流出に対しほとんど効果がないが，他器を系統へ接続したときに発生する励磁突入電流に含有された低次高調波の拡大を防止するために設置した。

5.3　力　率

力率の規制値については工場全体の負荷容量を考慮して−0.98（進み）～＋0.98（遅れ）であり，それに加え電源系統が非常に弱いため，高調波フィルタ設備を投入したときにおける220 kV系統の電圧変動率の厳しい指定があった。

アルミ電解負荷の特徴は，電解炉立上げ時の電圧が数V，365 kAであり，その後順次電解炉を増加して，DC1,580 V，365 kAに至るまで約6か月かけて運転を停止することなく段階的に上昇していくことである。この立上げ期間中においても可能な限り力率の規制値を守りながら，電圧変動率を抑えるために，高調波フィルタを低次と高次の二つに分け，遮断器により順次投入・開路できるようにした。

6　あとがき

世界最大級のアルミ電解用整流設備について紹介した。アルミの需要は今後も増加する見通しであり，さらに設備が大容量化していくと思われる。今後のアルミ電解炉の要求仕様に合わせて，今までの技術をさらに洗練させ，より経済的でかつ信頼性の高い整流設備を提供していく所存である。

参考文献

(1)　古木進一，石塚銀治．アルミ電解用整流装置（Sフォーマ）．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.296–301.

(2)　神尾明．大容量整流装置の発生する高調波とその抑制対策．富士時報．vol.69, no.12, 1996, p.626–629.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。