

クリーンルーム用電源供給システム

日下 豊(ひした ゆたか)

小端 伸二(こばた しんじ)

三橋 正徳(みつはし まさのり)

① まえがき

クリーンルームは、半導体産業、電子・精密工業、医薬品産業、食品産業などの広い分野で採用されている。クリーンルームシステムやクリーン機器などについては、本特集号の別稿で取り上げているので、本稿では、クリーンルームシステムを支える電源供給システムについて、その特徴や最近の技術、納入例などについて述べる。

② クリーンルーム電源の特徴

クリーンルームはさまざまな分野で採用されており、そのシステム構成や規模も各種各様である。また、クリーンルームの目的や運用の状況も千差万別である。

しかし、クリーンルームは一般的に、その性能(清浄度、温湿度など)を維持することが製品の歩留りや品質の維持に必要不可欠である場合が多く、電源システムに対して高信頼性が要求される。また、クリーンルームは、清浄度維持や温湿度条件維持のために、エネルギー消費が一般空調設備に比べて大きくなるため、省エネルギー性能も合わせて要求される。

2.1 高信頼性

半導体産業向けなどのスーパークリーンルームにおいては、サブミクロンオーダーのじんあいや温湿度条件のわずかな揺らぎが、製品の品質に大きな影響を与える場合が多い。また、超精密加工を行う製造装置などでは、いったん停止させると、安定的な生産を再開するまでに長時間の調整を要することがある。生物関連の施設では、実験用動物の損失を招いたり長時間を要する観察がやり直しになることもある。停電の与える影響は、時間・労力・コストなどの直接的損失から、製品の納期遅れによってユーザーの信頼を失うといった間接的な面にまで広がる可能性がある。

以上のようなことから、クリーンルームを支える電源供給システムには、高い信頼性が要求される。また、保守点検や追加改造についても、無停電での対応や短時間での復

旧が要求される。

2.2 省エネルギー

クリーンルームの清浄度は、基本的に空気をフィルタによって汙過することで維持されている。また、多くの新鮮な空気(外気)を取り入れている。したがって、清浄度が高くなるほど、空気循環量も大きくなり、空調系統の搬送動力エネルギーが増大する。同時に、温湿度条件を維持するために加熱・冷却・加湿などに使われる空調系統の熱源動力エネルギーも増大する。しかも、半導体産業などでは24時間操業が多く、クリーンルームシステムにおけるエネルギー使用量は膨大なものになる。

表1に半導体工場の冷房負荷の内訳例を示す。半導体工場では、製造装置発熱・外気負荷・送風動力の3項目で全冷房負荷の90%程度を占める。オフィスビルなどの一般空調では照明・伝熱・人体発熱などが熱負荷の大半を占めるが、半導体工場では全冷房負荷の10%にも満たない⁽¹⁾。

富士電機のファンフィルタユニット(FFU)システムは、省エネルギー面でも有利な方式であるが、クリーンルームを支える電源供給システム側でも、省エネルギーは重要な要素となる。省エネルギー手法としては、効率の良

表1 半導体工場の冷房負荷内訳例⁽¹⁾

負荷項目	冷房負荷	構成比
製造装置発熱	1,800,000 kcal/h	38.3%
外気負荷	1,600,000 kcal/h	34.0%
送風動力	950,000 kcal/h	20.2%
照明負荷	200,000 kcal/h	4.3%
伝熱負荷	130,000 kcal/h	2.8%
作業員	20,000 kcal/h	0.4%
合計	4,700,000 kcal/h	100.0%

【主要機器容量】

冷凍機：800RT×2台

ボイラ：4t×2台

風量 空調送風量：380,000m³/h

清浄空気循環量：2,700,000m³/h

総排気量：170,000m³/h

取入れ外気量：180,000m³/h



日下 豊

受変電・自家発電設備、クリーンルーム設備などのエンジニアリング業務に従事。現在、システム事業本部社会システム事業部技術第二部長。



小端 伸二

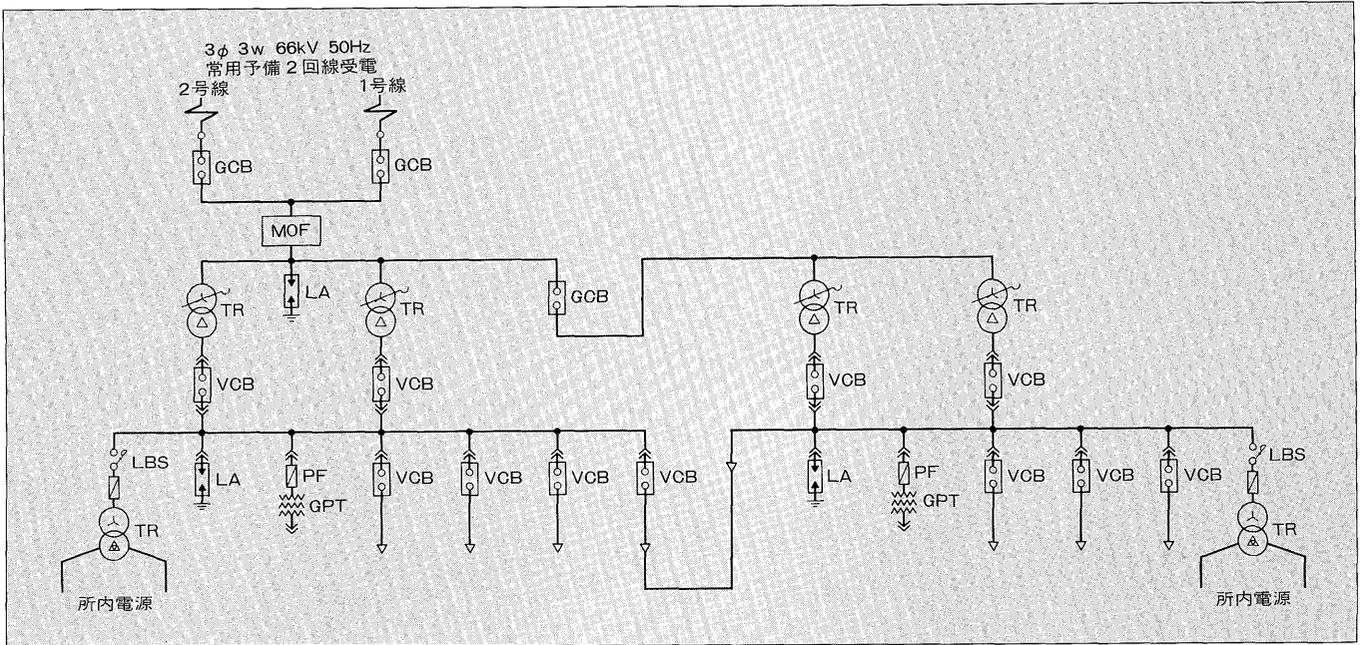
施設用電源設備の技術企画に従事。現在、システム事業本部社会システム事業部技術第二部長補佐。



三橋 正徳

社会システム分野における電源設備の企画・設計業務に従事。現在、システム事業本部社会システム事業部企画設計部。

図1 受変電設備の系統図例



い機器の採用と省エネルギーを考慮したシステムの採用によって、省エネルギーの環境を整備し、運用面を工夫しながら目標を達成していくことになる。

4章で、コージェネレーションシステム (CGS) と VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータシステムを紹介する。

3 最近の電源供給システム

3.1 受変電システム

クリーンルーム市場は、半導体製造分野を中心として、近年めざましい発展をとげており、設備の大規模化、自動化が進むとともに、高信頼性が要求されている。これらのクリーンルームユーザーからのニーズにこたえるために、安定した電力を供給すること、経済的かつ性能の優れた電源システムを構築することが重要である。

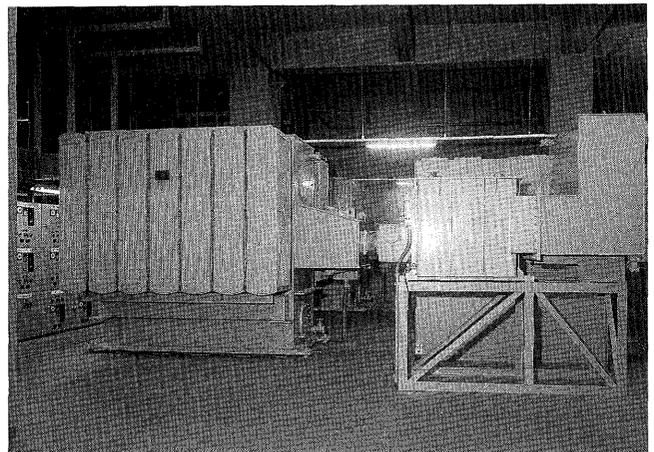
3.1.1 特別高圧受変電設備

前記のような背景のもとに、受変電設備には特別高圧受電方式を採用することが多く、常用一予備線を有する受電方式の採用や構内サブ変電所への供給幹線にもバックアップ回線を設けるなど系統の二重化を行って電源供給の信頼性向上をめざしている。特別高圧受変電機器においては、信頼性、省スペース、メンテナンスフリー、防災などの面から、60/70 kV 級、20/30 kV 級ともにキュービクル形ガス絶縁開閉装置 (C-GIS) が主流となってきている。

また、主変圧器には、メンテナンスフリーの面から、近年その用途が拡大しつつある、ガス入変圧器を使用する傾向が強くなっている。

C-GIS とガス入変圧器を組み合わせることにより、変電所内の主要機器が、メンテナンスフリーと不燃化の長所をもつ SF₆ ガス機器に統一され、高い安全性と省スペース化が図れる。

図2 C-GIS の外観



N99-2283-3

3.1.2 高圧受配電設備

高圧受配電設備には、前面操作、前面保守など操作性、保守性に優れた薄形配電盤が多く採用され、省スペース化が図られている。半導体工場などでは、メンテナンスや万一の事故時の停電を最短・最小限に抑えるために、変圧器を複数に分割し、高圧・低圧母線を母線連絡遮断器で連結して、相互にバックアップが可能な回路構成とすることも多い。さらには、二重母線式の配電盤や母線連絡遮断器の二重化によって、完全無停電メンテナンスを実現している半導体工場もある。

配電用変圧器は小形・省エネルギー・難燃化の特長をもつモールド変圧器が多く採用されている。

図1に系統図例、図2にC-GISの外観例を示す。

3.2 無停電電源システム (UPS, SPS)

有害ガスの排気ファンや半導体製造装置などは、停電による停止で、作業員への危険や製品不良などを生じて大きな損害となる場合が多い。このような生産設備の電源の瞬

断や停電への対策として、無停電電源装置 [UPS (Uninterruptible Power System) や SPS (Standby Power System)] が使用されている。

3.2.1 UPS, SPS の概要

(1) UPS は、整流器とインバータの二つの電力変換装置とバッテリーから構成される。常時は商用系統からインバータ給電を行っており、停電時にはバッテリーからインバータに電力を供給する。インバータ側故障時は直送バイパス回路へ無瞬断切換を行って負荷への給電を継続する。

(2) SPS は、一つの電力変換装置とバッテリーから構成されている。常時は商用電源から変換装置を経由せずに負荷に給電し、変換装置は充電器として機能している。停電時は、変換装置がインバータとして機能し、バッテリーから電力を供給されてインバータ給電となる。インバータ側故障時には、商用給電を継続する。

3.2.2 UPS, SPS の特長

UPS は、いかなる商用電源の変動 (瞬断、停電) に対しても安定した電力を負荷へ供給できるので、コンピュータシステムや計装システムに多く使用されている。

SPS は、常時は商用電源から負荷に直接給電されているため、電動機始動時などの突流電流への余裕を見込む必要がない。また、停電切換時に出力波形にわずかな変動 (瞬断) があるが、電力変換装置が1台であるため、UPS に比べて安価であり、高効率でランニングコストが低減できるので、工場の生産設備用の無停電電源として多く使用されている。

表 2 に UPS と SPS の主な特徴比較、図 3 に実施回路

例を示す。

表 2 UPS と SPS の主な特徴比較

項目	UPS	SPS
給電方式	常時インバータ給電方式	常時商用給電方式
常時の電源特性	定電圧定周波数	商用電源 (電圧降下の補正効果若干あり)
停電時の電源特性	定電圧定周波数	定電圧定周波数
電力変換器の構成	2台 (整流器とインバータ)	1台 (多機能インバータ)
運転効率	80~90%	100% (常時)
停電時のエネルギー	バッテリー	バッテリー
装置の信頼度	高い	高い
停電時の動作	無瞬断 フロート式では整流器停止のみ	無瞬断 (1/2サイクル以下) 充電器動作からインバータ動作に切換 (高速停電検出が必要)
高調波抑制効果	アクティブフィルタ機能付き	アクティブフィルタモード機能 (オプション)
寸法	—	一般の UPS に比べて小
価格	—	一般の UPS に比べて安価
用途	ホストコンピュータシステム (情報・通信機器) 負荷システムの規制少ない	コンピュータ負荷が主体でない負荷 OA, FA 電動機負荷 半導体製造ライン VVVF の無停電化, 高調波対策

図 3 UPS と SPS の実施回路例

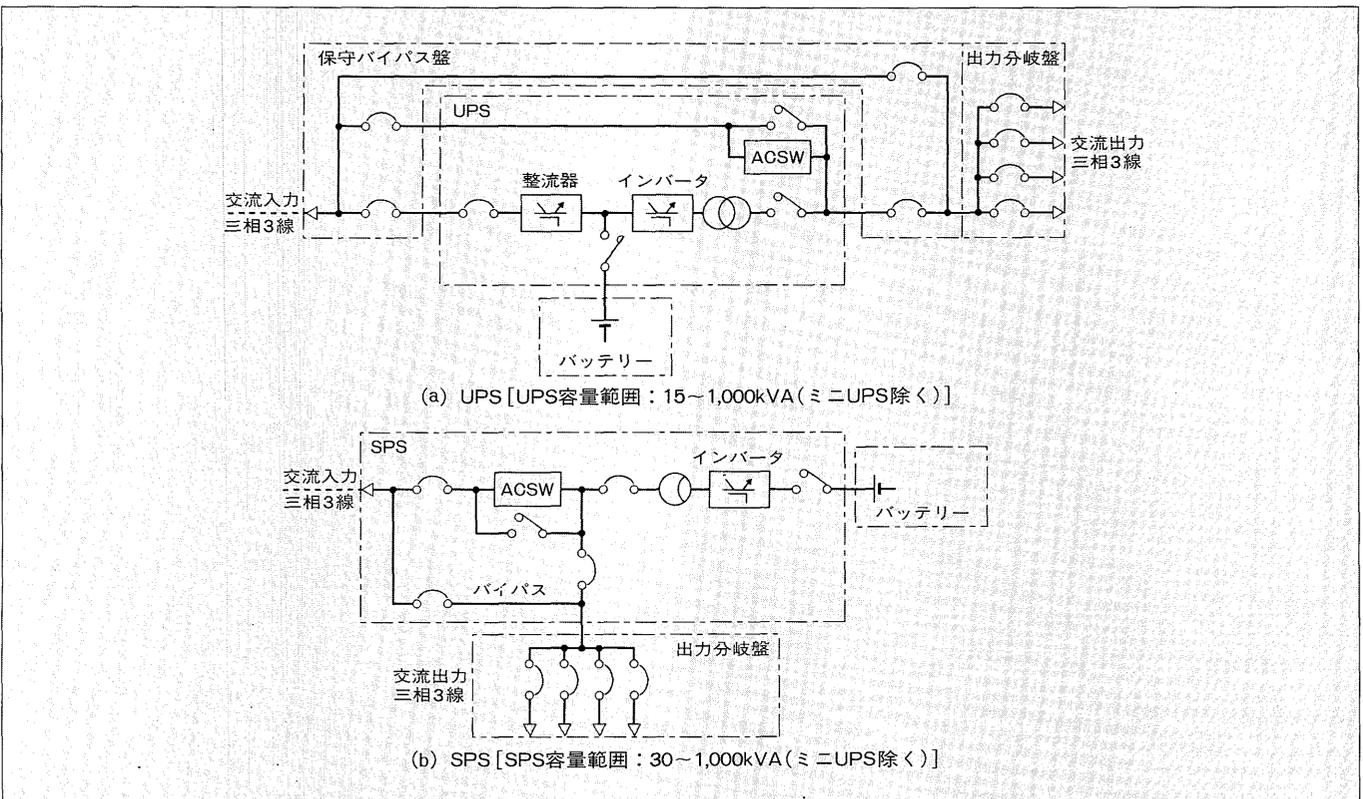


図4 クリーンルーム監視システムの構成

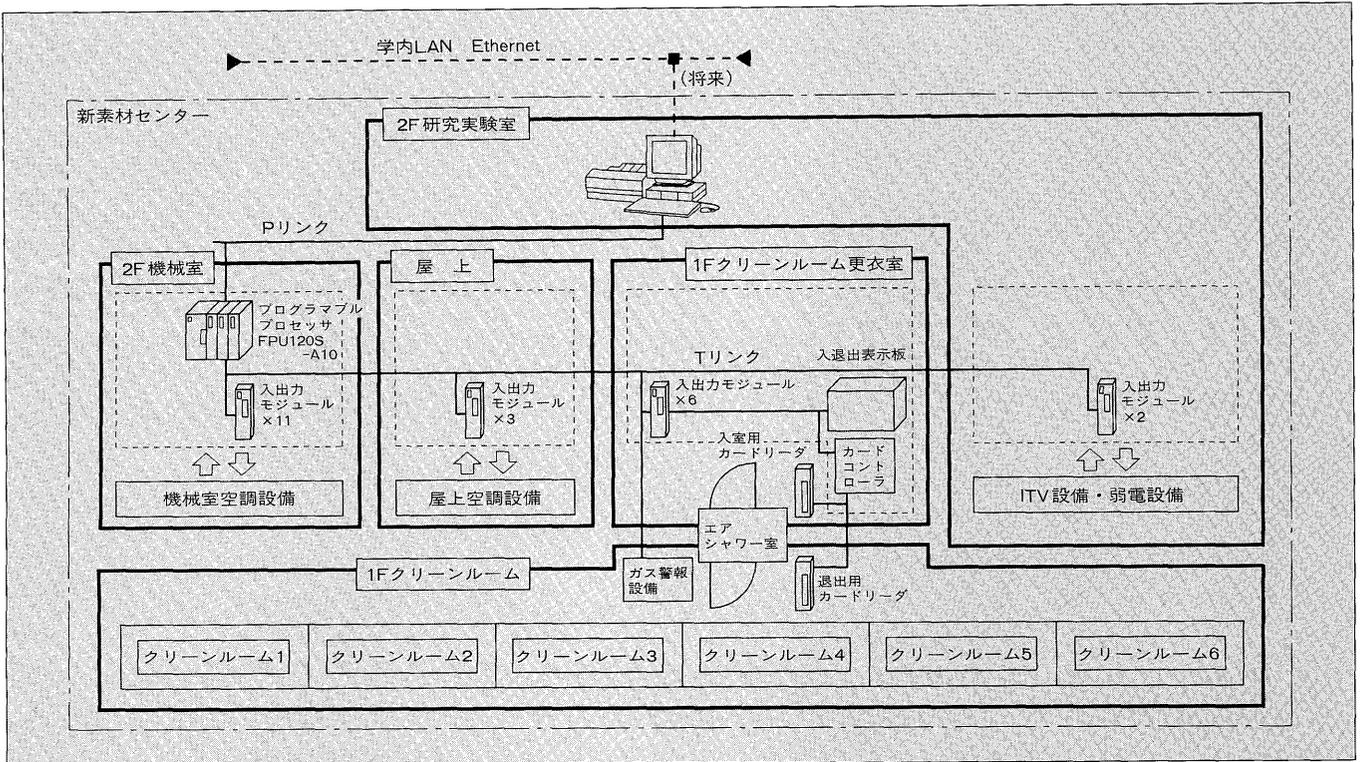
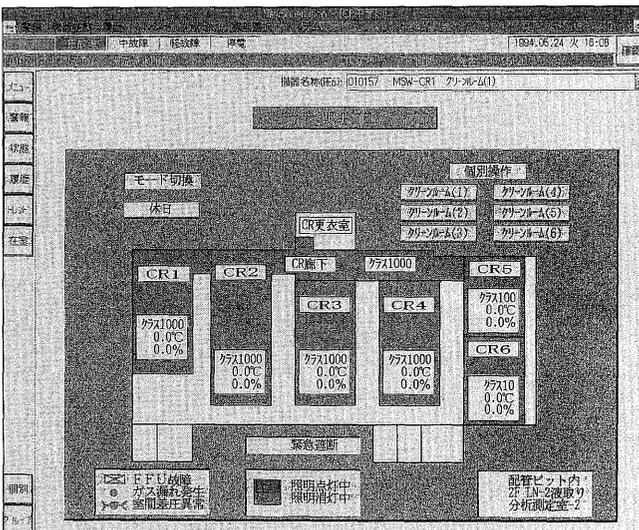


図5 監視画面例 (クリーンルーム平面図)



3.3 クリーンルーム監視システム

受変電、空調、照明、防災などの各種設備・施設を集中的に監視・制御するのが施設管理システムであり、クリーンルームでは、関連する電気設備や空調設備の監視・制御に加えて、クリーンルームにかかわる温湿度、清浄度、入退室などの管理も行うことになる。

空調設備・電源設備だけでなく、温湿度・清浄度などの記録は、製品歩留り悪化の原因究明などに際して重要なデータとなる。また、製薬分野のクリーンルームでは、これらのデータの収集・保管が義務づけられており、クリーンルーム監視システムが欠かせないものになっている。

北陸先端科学技術大学院大学に納入したクリーンルーム監視システムの構成を図4に、監視画面の例を図5に示す。このシステムでは、空調設備、冷温水系統、温湿度などの監視制御に加えて、ガス漏れ監視、純水装置の監視、入退室監視も併せて行っている。また、将来的にはEthernetによる上位連携を考慮したシステムとなっている。

4 省エネルギーシステム

省エネルギーシステムの手法には各種あるが、ここでは、発電装置の排熱を回収して、電力と熱を同時に供給し、省エネルギーを行うCGSと、送風機の電動機をVVVFインバータで駆動して、最適運転を行うことで省エネルギーを達成するVVVFインバータシステムを紹介する。

4.1 コージェネレーションシステム (CGS)

CGSとは、発電装置の排熱を回収し、熱と電力を同時に供給するシステムである。近年、省エネルギーの観点と分散電源によるエネルギー基盤強化の面からCGSの導入が増加傾向にある。

クリーンルームは、清浄度維持のための搬送動力、温湿度維持のための熱源動力が大きく、年間を通して安定した動力需要、熱需要があるため、CGSの導入に適している。

CGSの導入にあたっては、運転方式、機関選定などの検討を十分に行い、経済的メリットが出せるシステムを構築することが最大のポイントとなる。

<注> Ethernet : 米国 Xerox Corp. の登録商標

表3 最適CGSの選定比較例

項目	分類	現状	第一案	第二案	
		特別高圧受電設備	ガスエンジンCGS	ガスタービンCGS	
受電設備			900kW×2	1,800kW×1	
発電設備			特別高圧(商用-発電機系統連携あり)		
年間電力使用量			31,739,040kWh/年		
買電契約	契約種別	特別高圧 季節別時間帯別電力(東京電力)			
	契約電力	4,400kW	2,600kW	2,600kW	
	自家発補給電力	-	契約電力 900kW 使用量 1,296,000 kWh	契約電力 1,800kW 使用量 2,592,000 kWh	
発電機運転状況	燃料単価	35円/kg			
	燃料消費量		179kg/h×2	498kg/h×1	
	蒸気回収量		610kg/h×2	5,088kg/h×1	
	運転時間	夏期		2,208時間	2,208時間
		その他		5,832時間	5,832時間
	年間発電電力量		13,748,400kWh	13,748,400kWh	
	年間回収熱量		9,808,800 kg/年	40,907,500 kg/年	
買電電力合計		31,739,040kWh	16,694,640kWh	15,398,640kWh	
設備費(比率)		-	1.0	0.8	
年間ランニングコスト	買電電力料金	380.9百万円	195.5百万円	194.3百万円	
	自家発補給電力	-	18.1百万円	36.1百万円	
	燃料費	-	100.7百万円	125.1百万円	
	保守費	3.0百万円	23.4百万円	20.4百万円	
	排熱回収	-	-19.6百万円	-81.8百万円	
	人件費その他経費	11.0百万円	34.4百万円	14.0百万円	
	合計	394.9百万円	352.5百万円	308.1百万円	
電力単価(ランニングコスト/発電量)		12.4円/kWh	11.1円/kWh	9.7/kWh	

一方で、CGSは、商用電源停電時にバックアップ電源とすることも可能であり、電源の供給信頼性を向上させることができる。また、雷多発地区では、雷警報で、重要負荷を商用から切り離し、CGS単独運転とすることで、雷による生産ラインの瞬停を防止する運用も可能である。

熱源システムの構成にはさまざまな組合せがあるが、大規模なクリーンルームで多く採用されていたターボ冷凍機を、環境問題からのフロン規制の関係で吸収式冷凍機に置き換える傾向が強くなっている。この場合に、冷凍機を蒸気だき吸収式とし、ガスタービン発電機に蒸気出しの排熱ボイラを組み合わせたCGSとすることで、経済性に優れたシステムが構成できる。

表3にクリーンルームを有する半導体工場でのCGS比較例を示す。既設の特別高圧受電設備に対して、ガスエンジンCGSとガスタービンCGSを設置した場合の経済効果を比較したものである。この半導体工場では、大形の蒸気だき吸収式冷凍機が使用されており、CGSから発生する蒸気が年間を通じて有効利用されることもあって、蒸気発生量の多いガスタービンCGSが最も有利となっている。

4.2 VVVFインバータシステム

クリーンルームでは、一般空調に比べ、清浄度と温湿度維持のための空調動力エネルギーが大きくなる。また、空調を起動させてから清浄度、温湿度が安定するまでに一定の時間を要するため、休日・夜間などで生産ラインなどが停止しても、不用意に空調を停止させると、汚染などによる歩留り低下を招きかねない。そこで、非作業時でもクリーンルームの運転を継続させる場合がある。また、クリーン化のためのフィルタは、目詰まりにより次第に圧力損失が増えてくる。そのため、送風機には十分な余裕を持たせておき、ダンパ開度で風量を調整することになる。クリーンルーム系統の送風機にVVVFインバータを組み合わせて、最適風量運転を行うことで搬送エネルギーを大幅に節減できる。運用状況などで異なるが、20~35%の省エネルギー効果があるといわれている。

某半導体工場では、クリーンルームの空調機にVVVFインバータ盤を追加することで、昼間(生産中)の風量を最適にするとともに、夜間においても、清浄度を維持する

表4 VVVF インバータシステムの経済性検討例

分類 項目	AH-1			AH-2		
	現 状	インバータ採用時		現 状	インバータ採用時	
		昼 間	夜 間		昼 間	夜 間
空調機送風量 (m ³ /h)	65,240	65,240	43,600	46,840	46,840	35,500
電 力 (kW)	24.7	24.7	8.6	19.0	19.0	8.0
年間電力量 (kWh)	24.7kW×6,648h =164,206kWh	24.7kW ×(昼3,047h) =75,261kWh	8.6kW ×(夜3,601h) =30,969kWh	19.0kW×6,648h =126,312kWh	19.0kW ×(昼3,047h) =57,893kWh	8.0kW ×(夜3,601h) =28,808kWh
年間電気料金 (千円) 電気料金単価: 15円/kWh	(a) 164,206kWh ×15円/kWh =2,463千円	① 75,261kWh ×15円/kWh =1,129千円	② 30,969kWh ×15円/kWh =465千円	(a) 126,312kWh ×15円/kWh =1,895千円	① 57,893kWh ×15円/kWh =868千円	① 28,808kWh ×15円/kWh =432千円
	節減(a)-(b) 869千円 (35%)	(b)=①+② 1,594千円		節減(a)-(b) 595千円 (31%)	(b)=①+② 1,300千円	

運転時間内訳 昼 (8:00~19:00) 11h×277日/年=3,047h/年
夜 (19:00~8:00) 13h×277日/年=3,601h/年
合計 6,648h/年

最低限の風量にすることで、30%程度の省エネルギーを達成した。表4に、VVVF インバータによる省エネルギーの検討例を示す。

5 高調波対策

産業用電気機器や家庭用電気製品は、近年のパワーエレクトロニクス技術の進歩により、操作性や利便性が大きく向上しているが、これは、半導体応用製品の進歩と普及によるところが大きい。

これらの機器から発生する高調波電流が電力系統に流れ込み、電力系統の電圧をひずませ、電気設備や負荷設備に障害を起こすなど影響が顕在化してきている。

クリーンルームシステム関連機器でも、風量調整用のVVVF インバータなどの高調波を発生する半導体応用製品が多く使用されているため、高調波対策を十分に考慮して計画する必要がある。

5.1 最近の高調波事情

国内の高調波問題についての対応として「電力利用基盤懇談会 (通商産業省資源エネルギー庁長官諮問委員会)」や「高調波対策専門委員会 [(社)電気共同研究会]」の検討を経て、1994年9月30日「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」および「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」が制定された。

パワーエレクトロニクス応用製品は、今後ますます利用拡大が見込まれるため、今後も高調波問題に対する理解を深め、各方面で抑制対策の積極的な取り組みが展開していくことが期待されている。

5.2 高調波ガイドライン

高調波抑制対策ガイドラインの目的は、高調波対策専門委員会のまとめた高調波環境目標レベルをふまえて、高調波抑制のための技術要件を示したものである。

高調波抑制対策の基本事項を記述した「ガイドライン」

を解説し補完する目的で、「高調波抑制対策技術指針」が作成されているので、具体的には、この技術指針を参照されたい。

なお、この技術指針は次の五つの章で構成されている。

- (1) 抑制対策の基本的考え方
- (2) 高調波電流の算出方法と抑制対策方法
- (3) 高調波電流抑制のための技術
- (4) 具体的計算例
- (5) 高調波障害防止策

5.3 高調波対策技術

近年、PWM 制御を用いて高調波電流の発生を抑制した半導体変換装置の利用が広まってきており、今後も拡大していくと思われる。

需要家で実施できる現状での高調波抑制対策は、次の2種に大別される。

- (1) 高調波発生量の低減
 - (a) 多パルス化技術

変換機器を組み合わせて整流相数を多パルス化することによって高調波発生量を低減する。従来から一般的に採用されている。
 - (b) 変換装置の位相制御角の低減と電源側インピーダンスの増大

電流制御素子の点弧制御角(α角)を小さくすることや電源側インピーダンスを大きくすることで変換装置からの高調波発生量を低減する。
 - (c) PWM 制御方式による高周波化

高周波スイッチング素子 IGBT を使用した PWM 整流方式の変換装置が多く使用されるようになっている。スイッチング素子を高周波でオンオフさせることで、ひずみの少ない正弦波形に改善して、高調波発生量を大幅に低減する。
- (2) 発生した高調波の吸収
 - (a) LC フィルタ (受動的補償)

リアクトル (L) とキャパシタ (C) で直列共振回路

を構成して高調波電流だけを LC 回路にバイパスさせる方法で高調波を吸収する。

(b) アクティブフィルタ (能動的補償)

負荷設備から発生する高調波と逆位相の電流を回路に流し込んで高調波成分を打ち消す方式

富士電機の FFU システムは、クリーンルームの天井にフィルタとファンユニットを敷き並べて清浄度や温湿度を維持している。風量バランスの調節や省エネルギーのため、ファンユニットを VVVF インバータで駆動することが多く、大規模なクリーンルームでは、数千台のファンが VVVF インバータで駆動される。また、FFU システムでなくとも、空調機やポンプなどに VVVF インバータが使われていることは多く、高調波を十分に考慮した計画と施工が必要である。

インバータ二次側の配線をできるだけ短くするとともにシールドケーブルや金属性の電線管の採用で、空中伝搬を抑制する。インバータの一次側、二次側とも適切なフィルタを取り付けることで、高調波を大幅に低減させることができる。しかし、高調波の発生量やその影響の度合いはさまざまな要素により正確な予測を行うことは困難なので、厳密な対策のためには、実機での測定が必要である。

⑥ あとがき

電源システムを構成する機器は、高効率と高信頼性が要

求されるのは当然であるが、特に、クリーンルームシステムは、半導体製造などの分野で使用されていて、時間あたりの製造コストが高いため、計算センタなどと並んで高信頼性と省エネルギーが重要である。

個々の電源機器の効率化は、すでに高いレベルに達しており、省スペースのためのコンパクト化、システムとしての省エネルギー制御、安全性を高めるための不燃化・難燃化などが推進されている。

富士電機においても、総合電機メーカーとして、将来を見据えた電源機器・システムの開発を続けている。

クリーンルームシステムを支える電源システムも、受変電設備、UPS、SPS、CGS などの個々の設備機器だけでなく、クリーンルームや空調設備・電源設備などの監視システムを含めて、有機的な複合システムとしてとらえて、総合的な効率化や省エネルギーを図る必要がある。

富士電機は、クリーンルームシステムと電源システムを提供するメーカーとして、今後も最先端の技術を追求していく所存である。

参考文献

- (1) 日本空気清浄協会編：クリーンルームハンドブック、オーム社、p.91-92 (1989)
- (2) 早川一也編：クリーンルーム スーパークリーンルームの理論と実際、井上書院、p.65-66 (1986)

最近登録になった富士出願

[実用新案]

登録番号	名 称	考 案 者	登録番号	名 称	考 案 者
2530854	電動機速度制御装置	稗田 正昭	2533954	超音波スイッチ	橋本 貴 美麗賢次郎
2531028	光ファイバの接続端子台	西尾 三男	2534028	熱形過負荷継電器の反転駆動装置	星野 定雄 秋池 勝美
2531048	高圧真空電磁接触器	田村 英俊	2534139	電子回路用入力端子回路	黒田 栄寿
2532466	自動販売機の庫内奥行規制装置	西 正博	2534141	熱形過負荷継電器	秋池 勝美 小山 勉
2532645	回転電機の楔	村岡 政義	2534149	熱形過負荷継電器	秋池 勝美 小山 勉 小林 敏
2532848	電磁継電器	月花 正志 曳田 博			
2532855	押ボタン付電磁開閉器	日向 正光	2535625	熱動形過負荷継電器のバイメタル装置	大上 聡克 秋池 勝美
2532856	電気機器のレール取付装置	岡本 泰道	2536326	自動販売機の表示装置	平野由美子 小野田 誠
2532918	電磁接触器	中村 豊	2536938	実装プリント板への試験用リード線の接続装置	前田 保
2533953	熱形過負荷継電器の動作電流調整機構	星野 定雄 秋池 勝美			



*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。