

(解説)

半導体産業向高品質高信頼性コージェネレーション

New High-quality Reliable ULTRAPURE Cogeneration System



岡本秀寿*
Hidetoshi Okamoto



田中正幸**
Masayuki Tanaka

In advanced semiconductor manufacturing facilities, voltage dip is a major problem in connection with complex, long-lasting manufacturing processes. Production process interruptions due to voltage dip leads to unfinished product waste, process pile-ups, and product delivery delays. Kobe Steel and Air Liquide, Japan recently started marketing a high-quality, reliable cogeneration system, called the ULTRAPURE system, which eliminates the voltage dip problem common in some aspects of the semiconductor industry today (as introduced above). This system was originally developed by Air Liquide, France.

まえがき = 近年、半導体産業においては、生産設備システムの高度化および集積度のアップにより製造工程が複雑長期化している。工場で使用する電源の瞬時電圧低下により製造ラインが停止すると、不良品の発生による製造ロス費用の増大および製品の納期遅れが発生し問題となる。

ここでは、フランスの Air Liquide 社が開発し、日本国内では当社が設備の設計製作をおこなう半導体産業向けに開発された高品質・高信頼性コージェネレーション設備 ULTRAPURE (Air Liquide 社の商標) の特徴・機器構成・応用例を紹介する。

また、瞬時電圧低下の発生状況と、電気機器に対する影響、対策と課題について概要を説明する。

1. 瞬時電圧低下とその影響

1.1 瞬時電圧低下の定義

瞬時電圧低下(以下、瞬低と略す)とは、電力会社の

送電システムの故障により発生する短時間の電圧低下現象である。瞬低は、主に送電線などへの落雷などにより短絡故障・地絡故障が発生した場合に、故障点を保護リレーにより検出し、遮断器でそれを電力系統から除去するまでの間、故障点を中心に電圧が低下する現象である。

1.2 瞬時電圧低下の影響

近年、電気機器の利用は産業や都市生活に行き渡っており、社会の電気に対する依存度が高くなっている。また、製造設備の情報化と高度化により、広い範囲の産業において瞬低に鋭敏なコンピュータ、パワーエレクトロニクス応用可変速モータが使用されている。

瞬低が発生すると、その電圧低下の度合いおよび時間により電気機器に障害が発生する。これらの電気機器が影響を受ける電圧低下時間および電圧低下度合いについては、電気共同研究会が発行している「電気共同研究第46巻第3号瞬時電圧低下対策」に実測例が報告されている¹⁾(図1)。

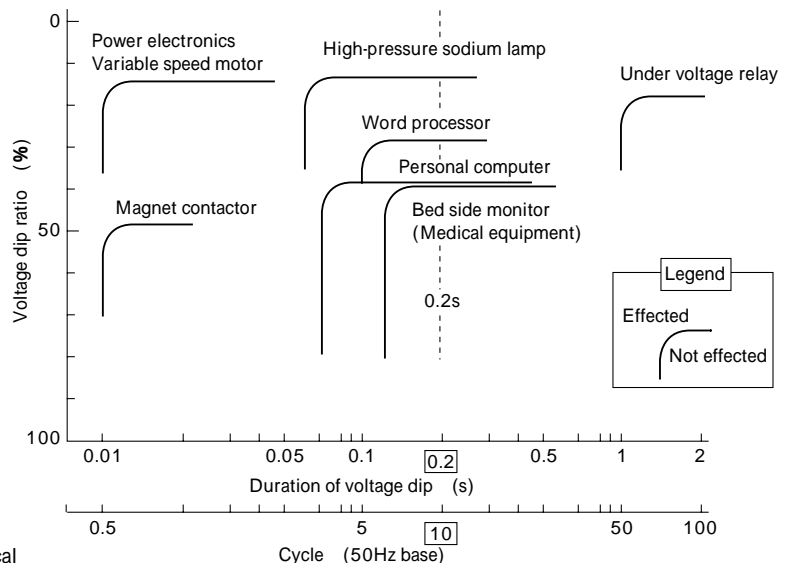


図1 負荷機器の瞬時電圧低下の影響例
Fig. 1 Effectiveness of voltage dip on electrical

*都市環境・エンジニアリングカンパニー エネルギー・原子力本部 **都市環境・エンジニアリングカンパニー エネルギーエンジニアリングセンター 技術部

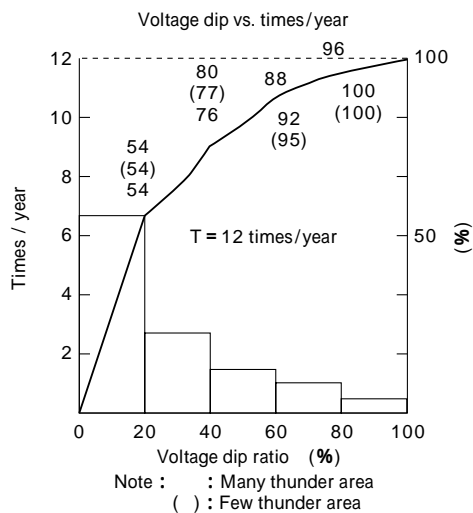
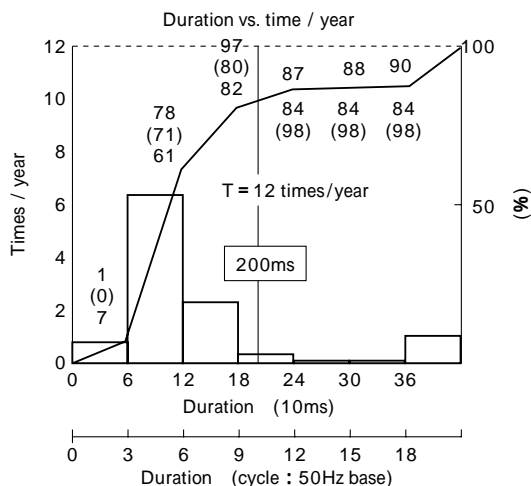
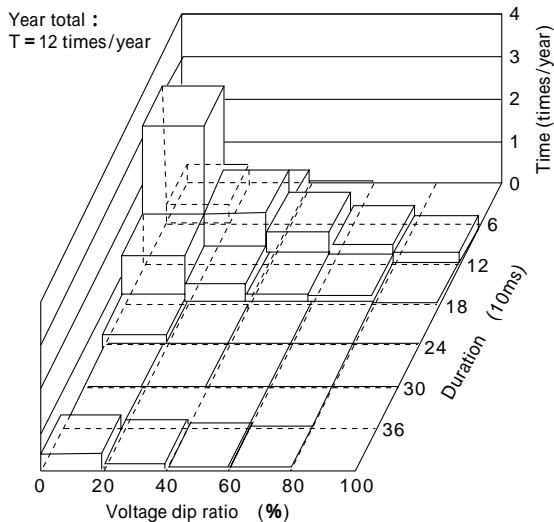


図2 平均的な年間の瞬時電圧低下の推定結果
Fig. 2 Average times of voltage dip for one year

瞬低により影響を受けるコンピュータや可変速モータを多く使用している製造業においては、瞬低により製造ラインの停止、不良品の発生がおこる。

特に半導体産業においては、瞬低に敏感な製造装置を使用しシリコンウエーハに複雑な精密加工を行う工程が連続している。そのため、その工程の途中で瞬低による製造ラインの停止や不良品が発生すれば、再び初めからやり直すことになり多大な製造ロスや納期遅れが発生する。

また、クリーンルームの空調設備が停止すると、クリーンルーム内の温度変化が生じ露光加工用のテロップが正常な位置に露光できずに不良品が発生する。このように半導体産業では瞬低のない高品質な電力が要求される。

1.3 国内の瞬時電圧低下の発生頻度

国内の瞬低の発生状況については、電気共同研究会が発行している「電気共同研究第46巻第3号瞬時電圧低下対策」に報告されている²⁾(図2)。この報告結果では、コンピュータ、パワーエレクトロニクスに影響する電圧低下継続時間1/2サイクル、電圧低下度20%以上の瞬低は年平均数回発生しており、このとき瞬低対策を行っていない場合は、製造ラインに何らかの支障が発生する。

2. 瞬時電圧低下対策技術と課題

2.1 瞬時電圧低下対策

瞬低に対する電源側の対応策としては、直列補償型瞬低対策装置、並列型瞬低対策装置、および電力系統の影響を受けない分散型電源の設置が一般的である。

上記の直列補償型瞬低対策装置は、コンデンサに電圧低下の対策に必要な電気エネルギーを蓄えておき、電圧低下が発生した場合に低下した分だけ電圧を補う瞬低対策専用の装置である。ただし、大型コンデンサの製作が困難でありコンデンサに蓄えるエネルギーに限界があるため、容量数百kVAが限界である。

の並列型瞬低対策装置には、電気エネルギーを2次電池に化学エネルギーとして蓄積する2次電池型無停電電源装置、およびフライホイールの回転エネルギーとして蓄積するフライホイール型無停電電源装置が知られている。

の分散型電源には、熱エネルギーの供給を兼ねたコージェネレーション装置が一般的に採用される。コージェネレーションの駆動装置としてはガスタービン、ディーゼルエンジン、ガスエンジン、燃料電池などが知られているが、工場全体のエネルギーを供給する場合は、大容量が必要なため燃料電池を除く駆動装置が採用される。

2.2 コージェネレーションと瞬時電圧低下対策

コージェネレーション設備は、瞬低防止対策のためにのみ導入されるのではなく、工場全体の電気・熱エネルギーのコスト低減およびCO₂排出量削減の環境対策として導入される場合が多い。いずれの場合も、電力の安定供給、周波数・電圧の安定化の目的で電力系統と接続されて運用されるのが一般的である。この場合、電力系統に瞬低が発生すると、コージェネレーション設備が系統の瞬低に引きずられ、コージェネレーション設備より電力供給を受けている負荷設備の電圧が低下したり、電力系統に過大電流が流れ出してコージェネレーション設備のトリップが発生する。

これを防ぐ方法として、瞬低の主な原因である落雷の発生する可能性があるときは、コージェネレーション設備を電力系統から切離し(解列)、単独運転をする処置がとられる。

また、電力系統に予想外の瞬低が発生した場合、高速に瞬低を検出しコージェネレーション設備を電力系統か

ら切離す高速解列装置が使用される。この高速解列装置の場合でも、瞬低が発生し電力系から切離されるまでの間（1/2～1サイクル程度）は、コージェネレーション設備の電圧の低下は防止することができない。従い、高速解列装置を採用した工場でも、雷が発生した場合にはコージェネレーション設備は電力系統から解列され、瞬低の危険がなくなったあと、電力系統に接続しなおす操作が行われる。再び電力系統と接続するときには、過渡的な電流が発生しないように、コージェネレーション設備の電圧と位相をあわせる同期操作が必要となる。

3. 高品質、高信頼性コージェネレーション技術

3.1 ULTRAPURE の概要

ULTRAPURE は、フランスの Air Liquide 社が電子機器や半導体産業向けコージェネレーション設備用に開発した、高品質・高信頼性電力を供給するための技術である。

ULTRAPURE の機器構成は図3に示されるように、電力系統とコージェネレーション設備・負荷設備の接続にフライホイール式無停電電源装置（UPS）を採用している。

このフライホイール式UPSは電源と負荷をカップリングチョークで接続し、カップリングチョークの1次コイルと2次コイルの間にフライホイール式蓄電装置とモータ・ジェネレータを接続している。

ULTRAPURE では電源に瞬低が発生しても、このカップリングチョークの働きによりコージェネレーションより流れ出る電流がブロックされ、負荷に供給している電圧は瞬低に影響されない。

また、電力系統と接続されている場合でも、カップリングチョークの機能により負荷側の電圧はフライホイール式無停電電源装置の電圧調整機能により調整が可能となっている。

また、フライホイールを定格の約1/2の回転数で回転させこれを増減させることにより、エネルギーを出し入れできるように運転されている。

コージェネレーション設備を電力系統と切離した単独運転においても、急激な負荷増減または発電機のトリップが発生した場合、コージェネレーション設備が負荷増減に対応するまでの時間、フライホイールのエネルギーをすばやく増減させることにより、コージェネレーション発電機の周波数・電圧の変動を抑えることができる。

これらにより、ULTRAPURE は瞬低対策だけでなく、負荷変動および電源側の電圧変動に対しても高品質・高信頼性の電力を負荷に供給できる装置である。

3.2 瞬時電圧低下保護の動作原理

電力系統に電圧低下が発生した場合、カップリングチョークで接続されたUPSのモータ・ジェネレータ（同期発電機）より電力系統側に進みの無効電力が流れ出る。この現象は、同期発電機を並列運転し、片方の発電機端子電圧を下げた場合に、他方の発電機より遅れの無効電流が流れる無効横流現象と同じである。

カップリングチョークの2次側より1次側に遅れ電流が流れることは1次側より2次側に進み電流が流れることであり、フェランチ効果によりカップリングチョークの1次コイルに電圧上昇が発生する。この電圧上昇により電源側の電圧低下分を補償し、コージェネレーション設備の電圧を一定にする。このとき、UPSモータ・ジェネレータの無効電力が増加し発電機内部インピーダンスによる発電機の端子電圧が低下する。この電圧低下は、カップリングチョーク1次コイルに流れる無効電流による1次コイルと2次コイルの相互誘導作用による電圧上昇により補償され、カップリングチョーク2次コイルの負荷側電圧は電圧の低下発生前と同じとすることができる。

3.3 ULTRAPURE の制御方式

3.3.1 コージェネレーション設備の制御

コージェネレーション設備の制御は、駆動装置出力を調整するガバナ制御と発電機の端子電圧を制御する電圧制御（AVR）とにより行われる。

コージェネレーション設備の負荷をできるだけ高くす

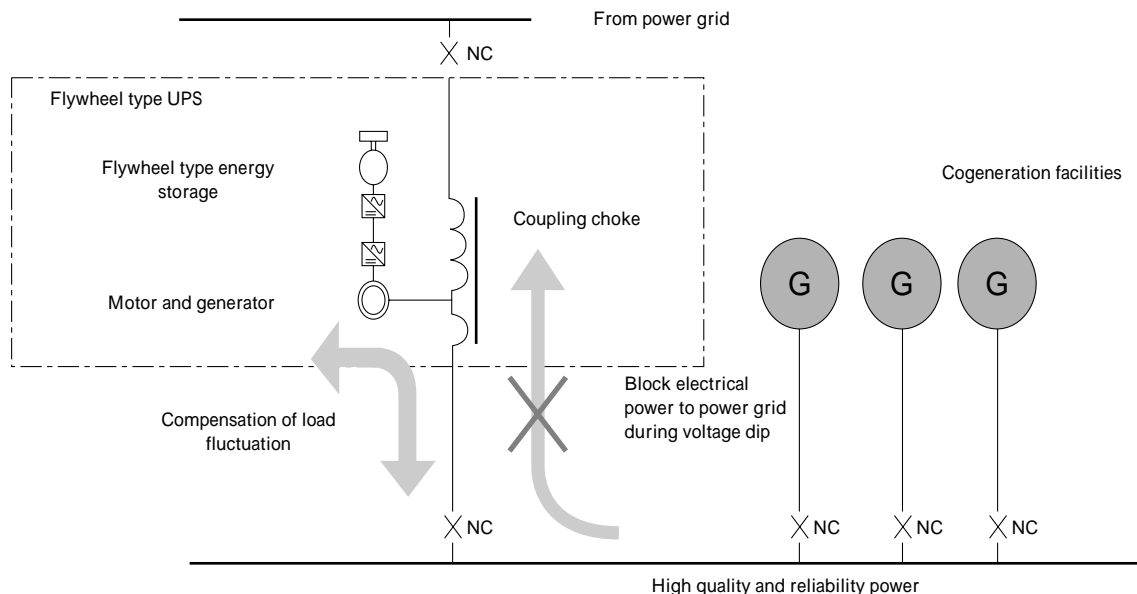


図3 ULTRAPURE のシステム構成
Fig. 3 System configuration of ULTRAPURE

る目的で、電力系統側からの電力を最小限となるように、ガバナ制御は駆動装置の出力を制御する（実効電力制御）。

発電機の電圧制御は負荷が消費する無効電力とコージェネレーション発電機の無効電力を同じにし、電源系統より供給する無効電力量をほぼゼロとするように制御される。これにより、カップリングチョークでの電圧降下できるだけ少なくする。

4. 実施例

Air Liquide 社は、ドイツのドレスデンにあるロジック半導体の製造工場に対し、電気・蒸気・温水などのエネルギー供給を行っている。

この半導体製造では、20m 秒以下の極めて短時間の瞬低であっても製造プロセスは停止し、ラインで製造中の半導体の多くは廃棄処分となる。瞬低復旧後の製造設備の調整もあわせると、損害は1回の瞬低で数億円レベルに達するといわれている。ドレスデンの半導体工場では、ULTRAPURE 技術により瞬低および停電のない安定した品質の高い電気供給を実現しており、高い評価を受けている。

4.1 ドレスデンのプラントの仕様

主要機器は、ガスエンジン発電機（キャタピラー社製 3 680kW × 8 基）と排熱回収ボイラ、吸収式冷凍機とフライホイール式 UPS（ピラー社製 1 620kVA × 3 基）から構成されている。ガスエンジンの燃料はロシアからの天然ガスパイプラインより供給を受けている。

工場の電源系統は、電力会社の電力系統に直接つながれた一般負荷系統と、フライホイール式 UPS を介し接続されるガスエンジン発電機から電力供給を受ける高品質電源系統の 2 系統からなる。半導体設備の重要負荷はこの高品質電源系統に接続されており、瞬低や停電から保護されている。

ガスエンジン 8 基のうち、常時は 6 基で運転を行い、1 基がメンテナンス中でも常に 1 基を予備機とし持つシステムとなっている。系統連係時はもちろん、電力会社からの電力供給がない場合でも、エンジン緊急停止時などの変動に対し重要負荷に安定した電力を供給している。

また熱エネルギーに関してはガスエンジンからの温水供給を主体としており、冷水供給用の吸収式冷凍機も熱源の主体を温水としている。このように温水を主体とするシステムにより、コージェネレーション設備の総合効率を高めている。

5. 経済性評価と特長

ULTRAPURE の経済評価方法について考察をおこなった。通常コージェネレーション設備の経済性は、以下の式で計算される電気代により概略の評価が行われる。

$$\frac{\{ \text{燃料費} + \text{ユーティリティ費} \} + \{ \text{メンテ代} \} - \{ \text{発生蒸気代} \} + \{ \text{設備償却費用} \}}{\{ \text{総発電量} \}} = \{ \text{電気代} \}$$

しかし瞬低や停電により生産に大きな被害が出る場合

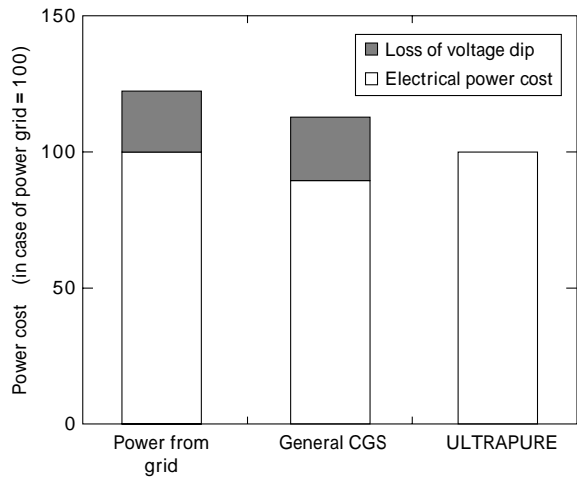


図4 電力コストの比較
Fig. 4 Power cost comparison

は、この損失分を加算した評価をする必要がある。この評価の一つとして、年間の生産設備に被害を及ぼす瞬低回数と1回の被害額を掛けた値を瞬低の損失額として評価に加える方法が考えられる。

$$\frac{\{ \text{燃料費} + \text{ユーティリティ費} \} + \{ \text{メンテ代} \} - \{ \text{発生蒸気代} \} + \{ \text{設備償却費用} \} + \{ \text{瞬低発生頻度} \times 1 \text{回の瞬低被害額} \}}{\{ \text{総発電量} \}} = \{ \text{電気代} \}$$

国内の標準的な電気、ガス単価をベースとした試算で、買電価格を 100 とした場合の一例を下記に示す。電気消費量が 10 000kW で瞬低の被害が年間 1 回で 1 回 2 億円の被害がある場合、瞬低損失を定量化すると図4のようになり、総合的には ULTRAPURE が最も経済面で優れている。電源事情の悪い開発途上国では瞬低回数が多くなり、このため ULTRAPURE がより経済面で優位となる。

むすび=本稿では、コージェネレーション設備とフライホイール型無停電電源装置とを組合わせた半導体産業向けの高品質・高信頼性コージェネレーション設備（ULTRAPURE）の紹介を行った。このシステムはドイツのドレスデンにある半導体生産工場に採用され、稼動後 5 年間、瞬時電圧低下のない高品質・高信頼性電力および熱エネルギーを供給している。

コージェネレーション採用によるエネルギーコスト、CO₂ 排出量と製品ロスの削減、製品納期確保など半導体産業の要求にこたえるコージェネレーション設備と考えられる。当社は、2002 年 6 月より日本エアー・リキード株式会社（現ジャパン・エア・ガシズ株式会社）とともに日本国内での販売を開始した。

参考文献

- 1) 社団法人電気共同研究会：「電気共同研究第 46 巻第 3 号瞬時電圧低下対策」(平成 2 年), p.9.
- 2) 同上 p.8.