

## 射出成形機用電力安定化装置の開発

## Development of Power Stabilizer for Injection Molding Machine

岩田 啓  
Kei Iwata中崎 友喜  
Yuki Nakasaki中野 耕太郎  
Kotaro Nakano博士(工学) 越智 清史  
Dr. Kiyoshi Ochi

## 要 旨

持続可能な開発目標であるSDGsや2020年以降の温室効果ガス排出削減に向けたパリ協定の採択等に応えるため、射出成形機を含む産業機械には、省エネルギー化が求められている。

そこで、射出成形機の更なる省エネルギー化技術として、大容量蓄電池を電動射出成形機に適用し、工場内の需要電力超過対策として、大容量電池から電力供給するための電力安定化装置の開発を進めている。近年、再生可能エネルギーの導入が進んでいるが、本技術は需給調整の役目を果たすことで、系統電源に対して負担をかけないプラスチック製品の生産を実現する技術とも関連する。

また、射出成形機はプラスチック製品を安定して量産する機械であるため、外的要因な影響を受けず、常に安定生産できる必要がある。それ故、電源事情の悪い地域で運転される射出成形機に、電力安定化装置を適用することで、電源遮断時にも生産が継続可能となる。

本稿では、射出成形機用の電力安定化装置のコンセプトについて説明する。

## — Synopsis —

Energy conservation is required for industrial machinery, including injection molding machines, in response to the SDGs, which are sustainable development goals, and the adoption of the Paris Agreement to reduce greenhouse gas emissions after 2020.

As a further energy-saving technology for injection molding machines, we are continuing to develop a power stabilization device that incorporates a large-capacity battery into the injection molding machine and takes measures against excess power demand in the factory. In recent years, the introduction of renewable energy has advanced. This technology is related to the production of plastic products that do not burden the grid power supply as part of the adjustment of the supply and demand of electric power.

The injection molding machine is a machine for mass-producing plastic products. Therefore, it is necessary that stable operation is always possible without being affected by external influences. By applying this device, it is possible to cope with frequent power outages in areas with poor power supply conditions and continue production stably even when the system power is cut off.

This paper describes the concept of the power stabilizer for injection molding machines.

## 1. 緒 言

1990年代中頃まで、射出成形機の駆動方式の主流は油圧駆動方式であったが、90年代後半から、急速に電動駆動方式へ移行していった。その社会的な背景として、CO<sub>2</sub>削減目標が世界的に決議された京都会議(1997)やISO14001(1996)の制定等がある。他方、技術的な背景として、パワーエレクトロニクス分野の技術革新や安価で高性能なマイクロコンピュータの普及等が挙げられる。これらが追い風となり、電動駆動方式の射出成形機の普及による省エネルギー化が急速に広がった。

現在においても、持続可能な開発目標であるSDGsや2020年以降の温室効果ガス排出削減に向けた国際的な枠組みであるパリ協定の採択、スマートメータの普及による電力需給調整等が、射出成形機の更なる省エネルギー化を求める原動力となると予測される。

本稿では、射出成形機の電源システムに関わる次世代の取り組みとして開発を進めている、射出成形機の電力安定化技術について述べる。

## 2. 電動射出成形機の省エネルギー技術

### 2.1 電動射出成形機の特徴

電動射出成形機は、射出、可塑化、型開閉、突出の駆動軸に各々サーボモータを搭載している(図1参照)。機械が静止している状態では、駆動源であるサーボモータはほとんど電力を消費しないため、油圧射出成形機に比べて、消費電力の大幅な低減が可能である。

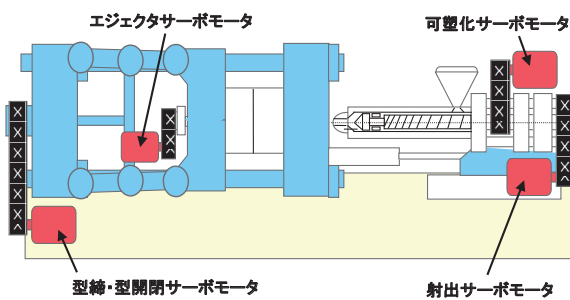


図1 電動射出成形機の駆動軸

### 2.2 サーボシステムとPWMコンバータ搭載

当社J-ADSシリーズのサーボシステムは、小型機から大型機まで様々な射出成形機に特化したサーボアンプから構成されている。射出成形機の大容量化や高応答化に対しては、複数のサーボ駆動軸の多軸同期制御技術により、ハイパワーかつ高精度なサーボシステムが実現されている(図2参照)。大容量サーボシステムはPWMコンバータを搭載することで、必要最小限の電力のみ供給

する力率制御、高調波抑制ならびに機械の運動エネルギーの電源への回生機能によって、省エネルギーかつ最小の設備容量で動作するシステムとなっている。

また、PWMコンバータにより、各駆動軸のサーボアンプへの供給電圧を一定に制御することができるため、電源変動の影響を受けにくいシステムとなり、常に安定した成形機動作も可能にしている。

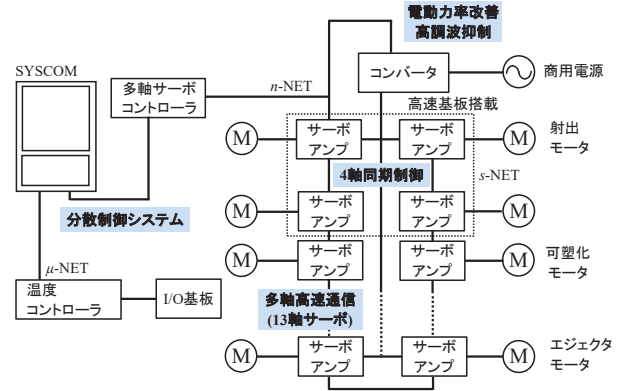


図2 大容量多軸サーボシステム

### 2.3 電源回生機能

PWMコンバータが省エネルギーである理由の一つに、電源回生機能がある。これは、射出や型締等の動作によって機械的に蓄積された運動エネルギーを電源に回生する機能である。

電源回生機能によって、図3に示すエネルギー回収が可能である。具体的には、サーボモータの減速時、機械の運動エネルギーを電源に回生する。従来、この回生エネルギーは、熱エネルギーに変換して排出されていたが、この機能が運動エネルギーを電気エネルギーに変換して系統電源に回生することで、省エネルギー化を実現している<sup>(1)</sup>。

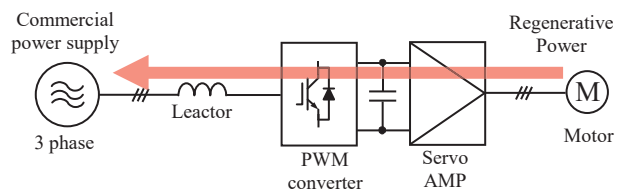


図3 回生エネルギーの流れ

## 3. 次世代の省エネルギー化技術

### 3.1 電動射出成形機の消費電力パターン

電動射出成形機特有の消費電力パターンは、図4に示すように、射出工程において瞬間的に大電力を必要とするが、他の動作軸のピーク消費電力は、射出工程の1/2~1/8程度に過ぎない点に特徴がある。それ故、ハイサイクル成形の場合を除き、平均的な消費電力は低い。

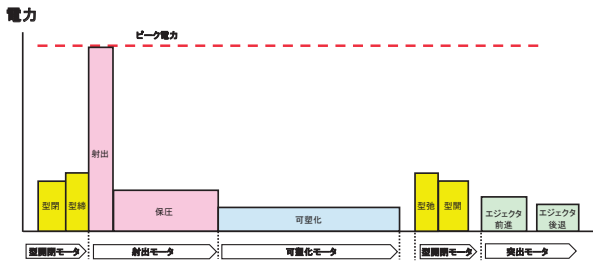


図4 電動射出成形機の消費電力パターン

このように射出用サーボモータの動作時間は、他の工程に比べて短いですが、瞬間的に多くの消費電力を必要とするため、この射出工程のピーク電力及び可塑化時に必要な最大電力に基づいて、お客様は受電設備を用意する必要があります。その結果、受電設備の増大が設備導入コストの増加を招き、さらに、その増大に伴いトランスやケーブルでの電気エネルギー損失も大きくなっている。

### 3.2 電源設備容量の低減効果

上述の電源設備容量の増大という課題の解決は、次のような複数の利点をもたらす。

- ① 射出成形機を導入する際、副次的に生じる電源設備の増設コストが下がり、射出成形機の導入が容易となる
- ② 系統電源から瞬間的な大電力の供給が不要になるため、トランスやケーブルにおけるエネルギー損失が低減される
- ③ 射出成形機内の電源容量 (kVA) が低減される

この電源設備容量の増大という課題の解決法として、射出成形機の電源に、近年発展の著しい大容量リチウムイオン電池を搭載する方法が考えられる。ハイブリッド自動車や電気自動車の需要拡大に伴い、大容量・高出力の特性を持つリチウムイオン電池が普及しつつある<sup>(2)</sup>。近い将来、この電池は射出成形機などの産業機械にも適用されると考えられる。

電源設備容量の低減効果を有する大容量電池を搭載した電力安定化装置については、2017年に試作した。そして、IPF2017において、電源設備容量の低減機能(図5)に加えて、電源遮断後であっても、数十分の継続動作が可能となる機能も搭載された射出成形機を展示した(図6)。

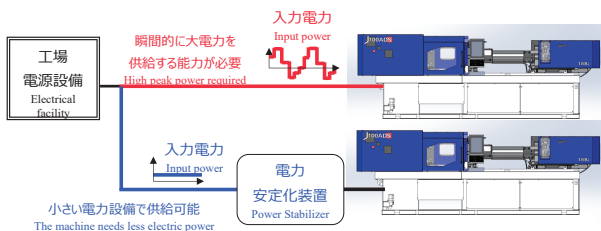


図5 IPF2017 出展装置の概要 (電源設備容量低減)



図6 IPF2017での出展状況

### 3.3 需要電力 (デマンド電力) 低減支援効果

大容量電池の搭載は電源設備容量の低減効果の他、工場内の需要電力も低減できるので、最終的に電気料金を減らすことも可能である。

図7に契約電力の概要を示す。電気料金は、契約電力と力率で決定される基本料金と、使用電力量で決定される電力量料金の合計で算出される。この契約電力は、記録型計量器により計算された該当月の最大需要電力と前11ヵ月の最大需要電力の中で、いずれかの最大値により決定される。特に、需要電力(デマンド電力)とは、30分単位の平均電力として計量される。

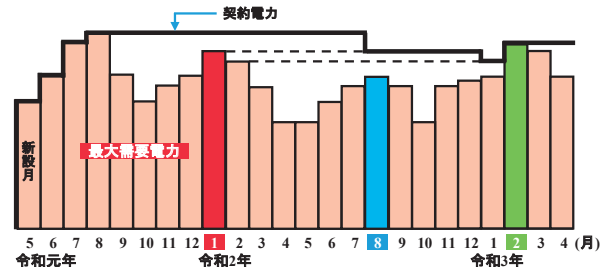
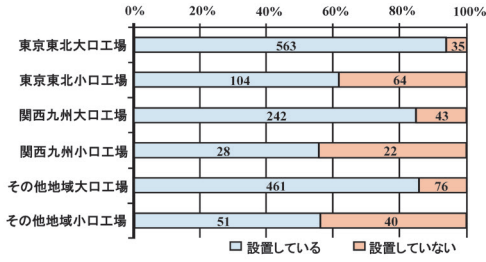
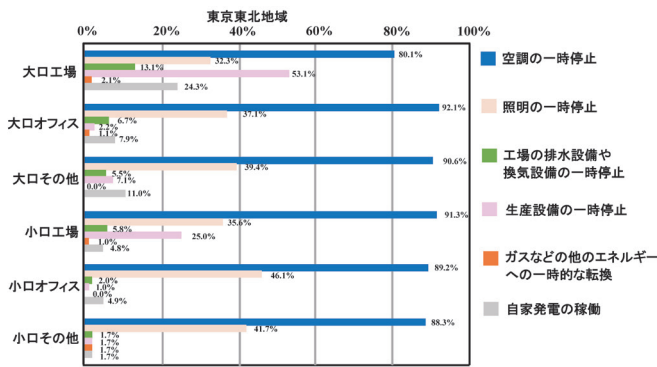


図7 契約電力の概要<sup>(3)</sup>

最大需要電力が一度更新されると、約一年間は更新された契約電力をもとに電気料金が算出されるため、多くの工場ではデマンド電力抑制対策が行われている(図8)。例えば、東京・東北の工場では、60%以上の工場がデマンド監視(需要電力監視)装置を導入している。また、デマンド逼迫時の対応としては、空調や照明の一時停止の割合が高いが、大口工場の50%程度、小口工場の25%程度は「生産設備の一時停止」を実施している。しかし、設備の一時停止は著しく生産効率を下げてしまうことになる。



(a) デマンド監視装置設置の有無



(b) デマンド逼迫時・警報発令時に計画しているデマンド抑制対策

図8 工場でのデマンド電力抑制対策<sup>(4)</sup>

また、生産効率を犠牲にして、設備の一時停止が実施される場合でも、電動射出成形機のようにサーボモータを搭載した産業機械は、デマンド逼迫時の自動電力遮断の対象とするのが難しい。その理由は、不用意な電源遮断が故障や事故を招くため、生産ライン全体の整合を取りつつ、手動にて機械を停止する必要があるためである。

この問題を解決する方法として、電力安定化装置の適用が挙げられる。デマンド逼迫時に射出成形機の動力源を、系統電源駆動から電池駆動に切り替えることで、系統電源からの給電を受けずに生産の継続ができる。生産効率を維持しながら、デマンド逼迫時の需要電力制限が可能となる技術である。

#### 4. 電力安定化装置の構成と動作モード

##### 4.1 電力安定化装置の構成

図9に電力安定化装置の概念図を示す。工場内電力を監視するデマンド監視装置(スマートメータ)の需要電力情報を基に、系統に連系されるスイッチの接続と遮断を行う。系統電源に対しては、PWMコンバータ(AC/DC変換器)を経由して三相交流電圧を直流電圧に変換する。その直流電圧を大容量電池の電圧へ変換するため、DC/DCコンバータを用いる。このDC/DCコンバータは装置の小型化・高効率化を実現するため、高周波絶縁方式を採用した。また、PWMコンバータの出力した直流電圧には、射出成形機の各軸のインバータ(DC/AC)とモータが接続される。さらに、PWMコンバータの直流電圧部

には交流電圧を発生させるインバータが接続され、交流電源によって駆動されるヒータ及び取出口ロボットなどの外部接続機器がこのインバータの負荷となる。図10に、上記の構成にて試作した制御盤の外観寸法を示す。

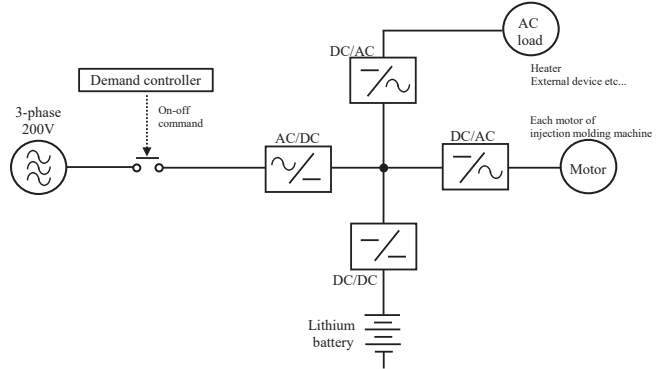


図9 電力安定化装置の概念図

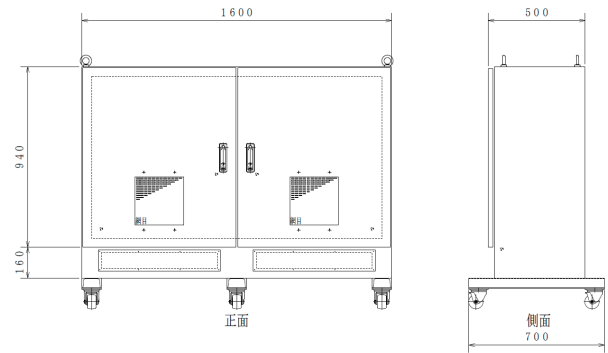


図10 電力安定化装置外観寸法

##### 4.2 電力安定化装置の動作モード

電力安定化装置には2つの動作モードがある。通常の動作モードの場合、射出工程などにおける瞬間的な大電力は大容量電池から給電し、使用する電源設備容量を抑える。それ以外の平均的電力については、系統電源から給電する。大容量蓄電池の充電は、工場内の射出成形機以外の消費電力が低い状態(目標デマンド電力まで余裕がある状態)を利用して行う(図11)。

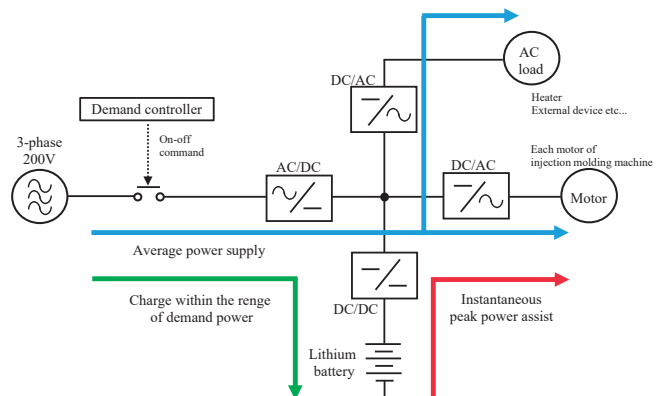


図11 瞬時電力ピーク抑制モード

次に、デマンド逼迫時の場合、デマンド監視装置からの情報を基に系統電源との間にあるスイッチを切り、系統電源からの給電を止め、速やかに大容量電池から射出成形機の各モータ軸に給電するとともに、交流電源を生成するインバータを経由して、ヒータや外部接続機器などの AC 負荷にも給電を行い、成形動作を継続する(図 12)。このモードであれば、デマンド逼迫時に限らず、停電が頻発する電源事情の悪い地域でも継続動作可能である。

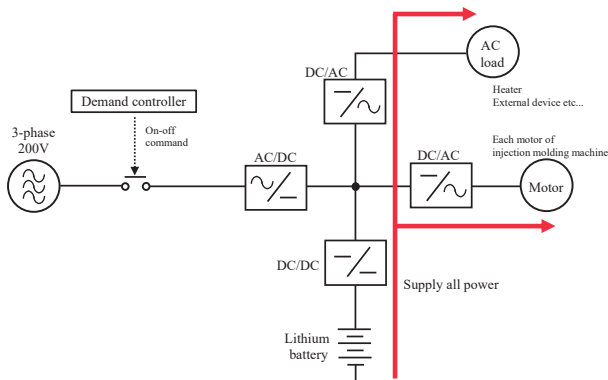


図 12 大容量電池による給電モード

### 4.3 電力安定化装置内部の大容量電池充放電装置

電力安定化装置内部の大容量電池充放電装置の概要を図 13 に示す。この回路構成にて、15kW 定格の装置として設計を行った。充放電装置の電力効率は、電力貯蔵装置の性能を大きく左右する。本装置の場合、系統電源から PWM コンバータを介して直流電圧を得た後、双方向絶縁型 DC/DC コンバータ [Dual Active Bridge Converter (DAB) コンバータ] にて大容量電池の充放電を行う。このコンバータは双方向に電力伝送が可能であり、近年、パワーデバイス技術と磁性材料の進歩により、実用レベルまで効率の改善が可能である<sup>(5)</sup>。

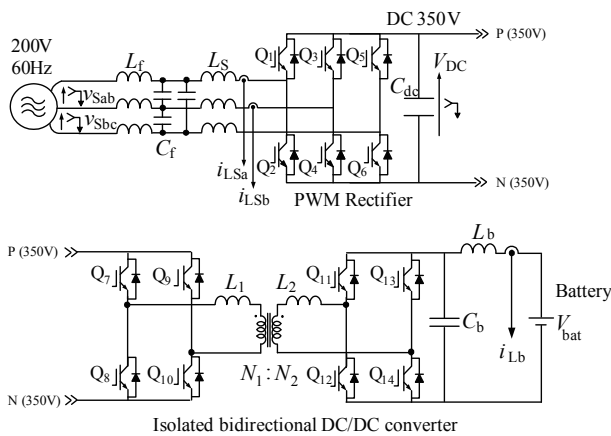


図 13 電力安定化装置内部の大容量電池充放電装置の概要

DAB コンバータの 15kW 伝送用高周波トランスは、フェライトコアにて構成した(図 14)。電源周波数 50Hz・60Hz 用の珪素鋼板を用いた 15kW 絶縁トランスの約 1/3 程度の体積であり、大幅に小型化されている。

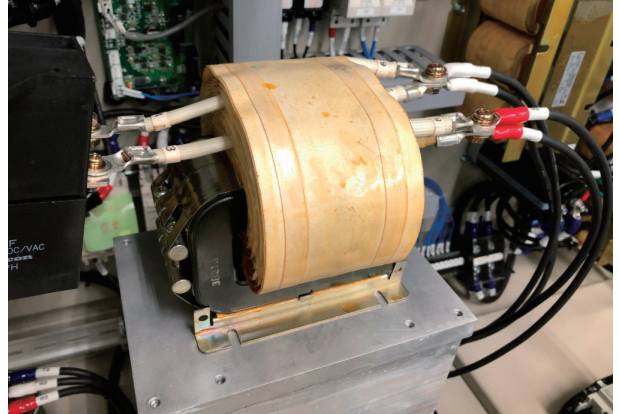


図 14 15kW 試作高周波トランス

### 4.4 DAB コンバータの制御

DAB コンバータの大容量電池の充放電動作については、位相シフト制御方式を採用した。2 台の単相フルブリッジコンバータは 20kHz のキャリアかつ 180° 通電の方形波電圧を発生させる。伝送電力  $P$  は方形波電圧の位相差  $\varphi$  [rad] にて制御可能である<sup>(5)(6)</sup>。

$$P = \frac{N_1 V_{DC} V_{bat}}{N_2 \omega L} \left( \varphi - \frac{\varphi^2}{\pi} \right) \quad (1)$$

※  $\omega = 2\pi f$  であり、 $f$  はスイッチング周波数

$V_{DC}$  は一次側電圧、 $V_{bat}$  は二次側電圧

$V_{DC}$  及び  $V_{bat}$  が定数として簡略化すると、大容量電池に接続したフィルタインダクタ電流(充放電電流)を位相差  $\varphi$  [rad] にて操作できる。マイコン・FPGA にて構成した制御器により図 15 の制御方式を実現した。また、図中の Phase Shifter については、図 16 に示すタイムチャートで表現されるが、この論理回路を FPGA にて実装した。

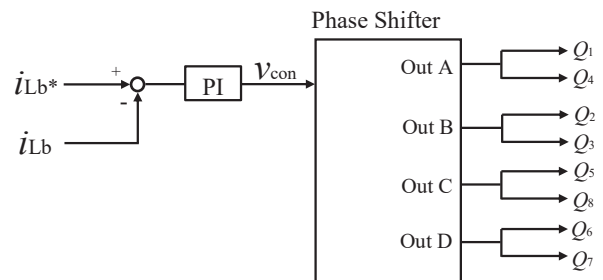


図 15 絶縁型 DC/DC コンバータ制御回路

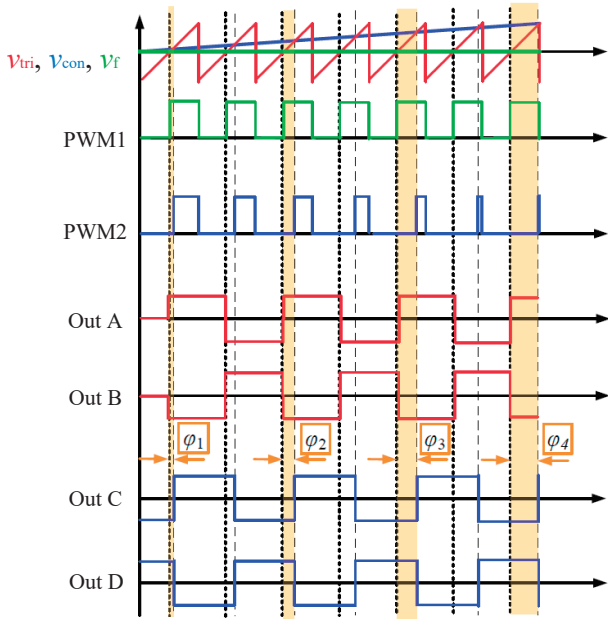


図 16 タイムチャート (Phase Shifter)

試験装置にて 10kW 充電試験を実施した際の電圧・電流波形を示す(図 17)。開発した制御器により、10kW 指令通りの電流がリチウムイオン電池に流入している。

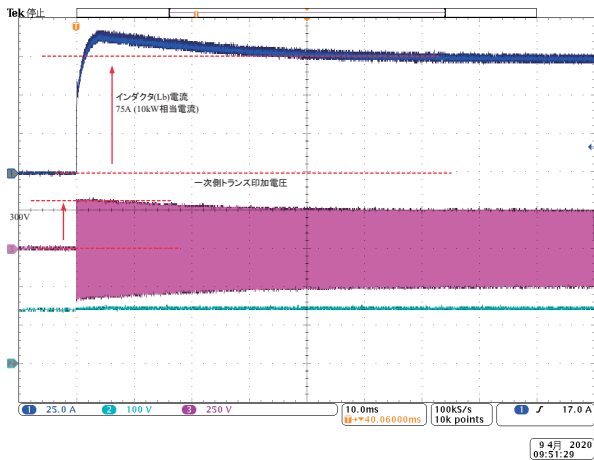


図 17 10kW 充電電流制御波形

### 5. 需給調整市場と電力安定化装置

近年、需給調整市場における バーチャル・パワー・プラント(VPP) 事業の一環として、系統接続された電気自動車(EV)の車載蓄電池を活用して、双方向に電力を融通し、電力の需給バランス調整を行う Vehicle-to-Grid (V2G)実証<sup>(7)</sup>が開始された。これらは 2000 年代前半に提唱されたスマートグリッドの概念(図 18)の延長として位置づけられる取り組みであり、Factory Energy Management System (FEMS)と呼ばれる工場のエネルギー管理システムも、その範疇となる。

FEMS 実現のため、射出成形機には、工場の電源設備の使用率を下げつつ、射出や型締めといった大電力を必要とする工程に安定的な電力供給を確保することが必要となるので、蓄電池を搭載する技術的な必要性がある。V2G や家庭用・業務用エアコンディショナ、ヒートポンプ給湯器による調整力の提供<sup>(8)</sup>に代表される需要家側エネルギー資源を活用した VPP に対しても、蓄電池搭載した射出成形機は適合しやすい。コンセプトとして示したデマンド逼迫時の電力安定化装置の動作モードは、電力需要を減らす要請「下げデマンドレスポンス(DR)要請」に対して、系統電源から射出成形機を切り離して電池駆動にすることで応答可能である。逆に、電力需要を増やす要請「上げ DR 要請」に対して、蓄電池を充電モードに変更すれば、蓄電池容量の許す限り対応が可能となる。複数台の蓄電池搭載射出成形機群の動作モードを制御して、全体のエネルギーを管理すれば、V2G と同等の需要家側での需給調整効果を得ることが可能である。

今後、電気自動車や再生可能エネルギーの普及拡大が見込まれるが、その普及とともに需要家側での需給調整に対する電力市場についても整備される。調整力の提供は電気料金削減等として需要家側へ還元されるとともに、再生可能エネルギーが大量導入された電力システムの安定性への貢献となる。蓄電池搭載の射出成形機の開発は、再生可能エネルギーの安定的な運用の一端を担い、次世代電力システムへ寄与する技術となるため、持続可能な社会への貢献に繋がると考えられる。

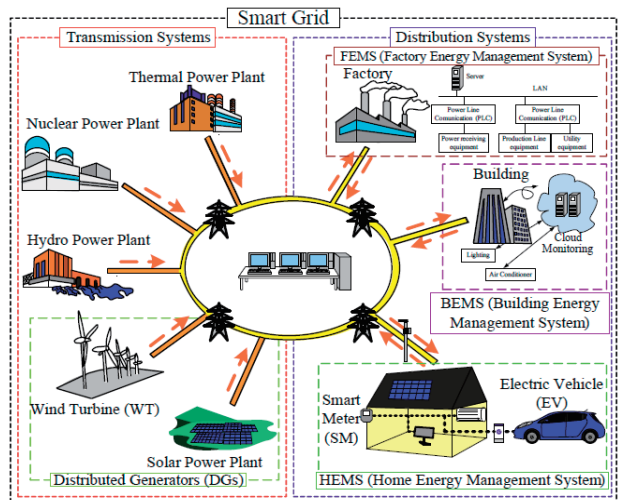


図 18 スマートグリッドの概念図<sup>(9)</sup>

## 6. 結 言

電動射出成形機に大容量電池を組み込むことで、射出成形機特有の電源設備容量の増大という課題の解決が可能であることを示した。さらに、大容量電池の搭載はデマンド逼迫時に煩わしい機械停止作業をせず、生産を継続しながらの需要電力の低減支援を実現するという、新たに可能となるアプリケーションのコンセプトを示した。

また、電力貯蔵を目的とする装置では、大容量電池の充電放電装置が心臓部であり、その性能が効率を左右する。本稿ではその制御方法や高周波トランスについて紹介するとともに、電力安定化装置に実装したパワーエレクトロニクス技術について焦点を当てた。

最後に、蓄電池搭載射出成形機が、需要家側の電気製品(電力貯蔵装置)を活用した VPP 事業との親和性があり、持続可能な社会発展を目標とする次世代電力システムに対して、需要家側からの貢献が可能であることを述べた。

この電力安定化装置は、二つの技術的な層によって構成される。第一層は、電力を効率よく所望の電圧・電流に変換するパワーエレクトロニクス技術であり、この装置の基礎的な動作を支える。第二層は、装置に搭載する電池容量等のハード構成を含め、時々刻々と変化する工場内電源系統の中での装置の最適運用を追求する技術であり、今後、時系列解析分野の応用技術を取り入れて展開を図る予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 宗盛大河, 越智清史, 横林武, 福重陽一, 布下昌司: “射出成形機の電動化と省エネルギー技術 環境対策と更なる省エネルギーを目指して”, プラスチックエージ (2009)
- (2) 資源エネルギー庁: “定置用蓄電池の価格低減スキーム”, (2017)
- (3) 東北電力, 2020/06/25 access, : “契約電力について” <https://www.tohoku-epco.co.jp/dbusiness/service/>
- (4) 山口順之, 村上善紀: “業務・産業需要における BEMS/ デマンド監視・制御装置のデマンドレスポンスへの活用の可能性”, 電力中央研究所研究報告 Y12022 (2013)
- (5) 井上重徳, 赤木泰文: “双方向絶縁形 DC/DC コンバータの動作電圧と損失解析”, 電気学会論文誌 D, Vol. 127 (2007), No.2, pp.189-197
- (6) R.W. De Doncker, D.M. Divan, and M.H. Kheraluwala: “A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high-power applications”, IEEE Trans. IA, Vol.27 (1991) No.1, pp63-73
- (7) 日本エネルギー経済研究所: “Vehicle-to-Grid 導入の利点と課題” IEEJ (2019)
- (8) 翁康太, 松橋隆治: “低炭素機器普及促進手法のインバランス調整資源確保への応用可能性に関する研究”, 第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2019)
- (9) 横山明彦: “よりスマートなグリッドの構築に向けて (I)”, 電気学会論文誌, vol.130 (2010), No.2, pp.94-97