

## 省エネルギー型多ループ制御系に関する研究

### Peak-power control in a multi-loop-control system which used SSR

○佐々木友紘\*, 伊藤孝徳\*, 千葉茂樹\*, 石橋政三\*\*, 伊藤菊一\*, 長田 洋\*

○Yuko Sasaki\*, Takanori Ito\*, Shigeki Chiba\*, Shozo Ishibashi\*\*, Kikukatsu Ito\*, Hiroshi Osada\*

\*岩手大学 \*\*株式会社チノー

\* Iwate University, \*\*CHINO Corporation

キーワード：省エネルギー (energy saving), ピーク電力 (peak power), 多ループ制御系 (multi-loop-control system),

連絡先：〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学大学院 工学研究科

電気電子・情報システム工学専攻 佐々木友紘, Tel: 019-621-6381, E-mail:

## 1. 序論

工場の電気式加熱炉など, 半導体リレー (SSR: Solid State Relay) 駆動型調節計が複数搭載された多ループ制御系においては, その立ち上がり時には全 SSR が同時点孤され, そのときのループ数に比例したピーク電力が必要となる. 2011 年 3 月 11 日以降, 我が国の電力供給力は大幅に低下している. このため, ピーク電力の抑制が求められることとなり, 工場などではその対策を迫られている<sup>1)</sup>.

SSR 駆動型多ループ制御系においてピーク電力を抑制する技術には, 代表的なものとして位相制御方式およびタイムシェアリング方式等があるが<sup>2)</sup>, いずれも負荷へ投入する電力量を大幅に減らさなくてはならず, 立ち上がり時間の大幅な遅延等につながる.

本研究は, 既存の調節計と SSR との間に「SSR パルス変換ユニット」を挿入することで, 負荷への投入電力量の大幅な減少を伴わずに, ピーク電力量を抑制する技術を提案するものである.

## 2. SSR パルス変換ユニット

Fig. 1 は, 4 ループ制御系 (L1~L4) における調節計, SSR, 負荷, および SSR パルス変換ユニットの構成を示す. SSR パルス変換ユニットは調節計と SSR の間に設置し, 調節計からの PWM 信号を変換して SSR へ伝送する.

Fig. 2 は, SSR パルス変換ユニットによる SSR 駆動動作概念図を示す. 全ループ中の任意のループの SSR 点孤を一時的に停止することにより, ピーク電力を抑制する方法である. 同図では, PWM 信号がアクティブになるタイミングで同時

点弧を3ループまでに制限することで、最大ピーク電力を元の3/4に低減する様子を示している。

Fig. 3は、SSRパルス変換ユニットのブロック図を示す。調節計からのPWM信号(PWMin)に対して、最大同時点弧軸数(以後AXmaxと表現、100%は全軸同時点弧、50%は同時点個数1/2)に応じて出力する信号(PWMin)を調整する。なお、SSR点弧を制御するには、点弧のタイミングを図る必要があり、負荷電源の周波数を知る必要がある。そのため、負荷電源の周波数検出部が必要となる。

まず、周波数検出部で負荷電源の周波数を識別し、その結果を元にPWMinにループ数とAXmaxに応じた制御パルスを乗算してPWMinを出力する。例えば、4ループ制御系の場合、50Hzの電源に対しては、 $20\text{ms} \times 4$ を演算周期として計算することになる。Fig. 4は、AXmaxと出力の関係を示す。4ループ系でのAXmaxは、25% (1チャンネルのみ同時点弧可)、50% (2チャンネル同時点弧可)、75% (3チャンネル同時点弧可)、100% (全チャンネル同時点弧可) から任意に設定することが可能である。これにより、系の最大ピーク電力もまた、25%、50%、75%、100%まで設定できることになる。なお、出力信号生成アルゴリズムとしては、シフトレジスタとランダムが考えられるが、本試験ではシフトレジスタ方式の調整アルゴリズムを使用した。

Fig. 5は、PWM信号がアクティブの時に点弧調整で削除された分を、インアクティブになるタイミングで補償する変換方式を示す。これにより、さらに電力を有効に利用できるようになると思われる。

ここでは、補償アルゴリズムを搭載しない「基本型」、および補償アルゴリズムを搭載した「補償型」パルス変換方式による電力量制御に関して実験を行った。



Fig. 1 4ループ制御系における構成

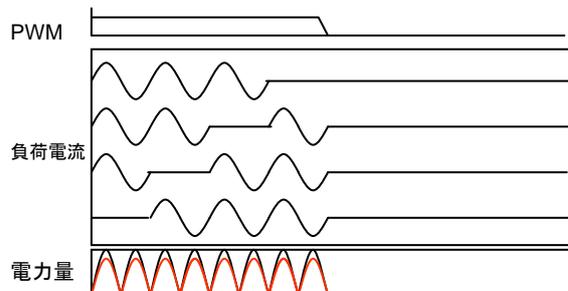


Fig. 2 パルス変換方式による負荷電流と電力量

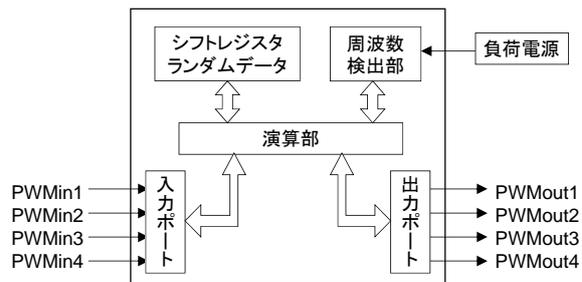


Fig. 3 SSRパルス変換ユニットのブロック図

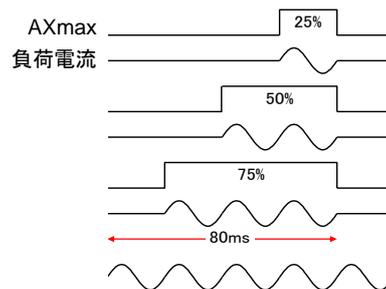


Fig. 4 負荷電源周波数 50 Hz の場合の AXmax と出力の関係

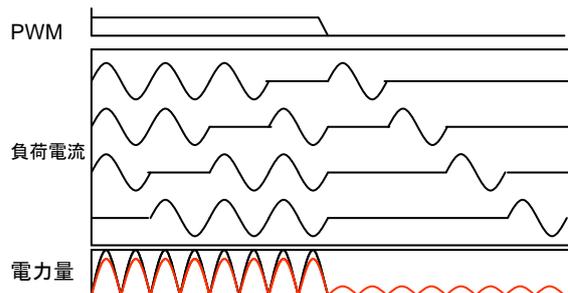


Fig. 5 補償型パルス変換方式による負荷電流と電力量

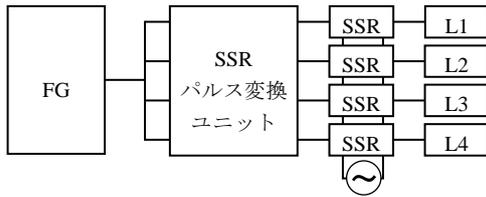


Fig. 6 開ループ試験装置の構成

### 3. 実験と考察

#### 3.1 開ループ制御系

制御負荷対象を半田ごて（4本：L1～L4，20～30 W）として，ファンクションジェネレータより周波数 1 Hz（Duty 比 50%）の方形波信号を SSR パルス変換ユニットに入力し，負荷の温度応答，ピーク電力，積算電力を計測した． Fig. 6 は，試験装置の構成を示す． SSR パルス変換ユニットは，1 チップマイコンである dsPIC を用いて作製した． dsPIC は DSP を内蔵しているため高い信号処理能力を有しており，本ユニットにおけるリアルタイム信号処理に適している<sup>3)~5)</sup>． なお，負荷の温度は K 型熱電対で計測し，電力量の計測はクランプ電力計（CW121：YOKOGAWA）を用いて計測した．

Fig. 7 および 8 は，それぞれ基本型および補償型の開ループ昇温特性を最大同時点弧軸数 AXmax をパラメータとして示す． 同図より，基本型では，AXmax が少なくなるとそれに比例して到達温度も低くなるが，補償型では，AXmax が 50% までは電力抑制を行わない 100% と大きく変わらない到達温度となっていることがわかる．

Fig. 9 は，AXmax と全負荷での総積算電力量の関係を，基本型と補償型で比較して示す． 同図より，基本型の総積算電力量は AXmax に応じた出力特性となるのに対して，補償型では，AXmax が 50% 以上では 100% と同じ電力量となっていることがわかる． これは，補償型のアルゴリズムが有効に作用していることを示している．

Fig. 10 は，負荷 L4 における立ち上がり時間を

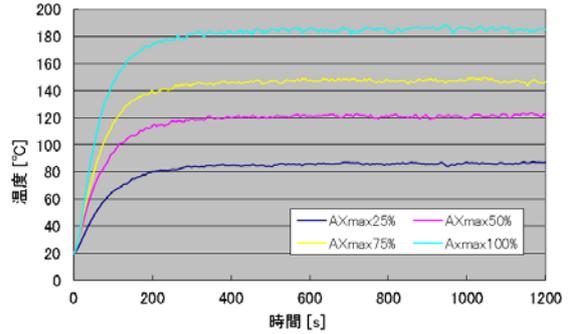


Fig. 7 基本型の開ループ昇温特性

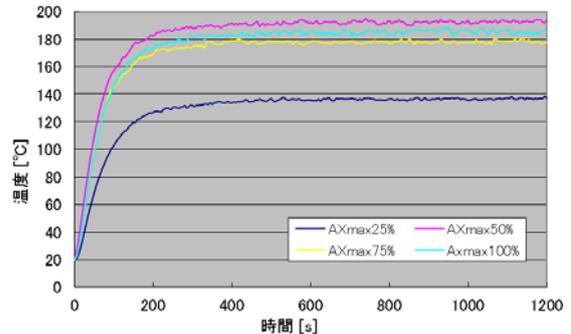


Fig. 8 補償型の開ループ昇温特性

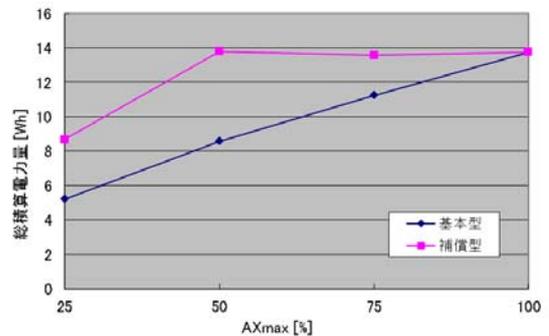


Fig. 9 AXmax 対ピーク総積算電力量特性

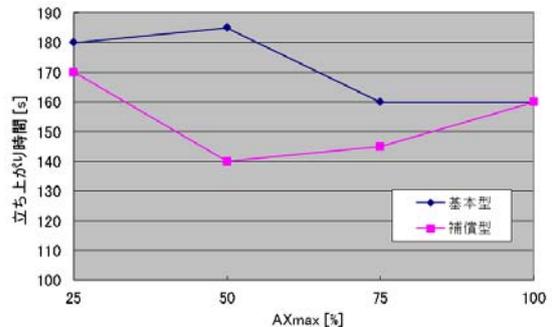


Fig. 10 AXmax 対立ち上がり時間特性

AXmax の関数として示す． 同図より，補償型アルゴリズムにより制御した負荷の立ち上がり時

間は、基本型のそれに対して最大で 1/2 程度となっており (AXmax : 50%), 補償型アルゴリズムを適用することで、ピーク電力を抑制しながらも制御性能を維持できることが示唆された。

### 3.2 閉ループ制御系

開ループ実験時と同様, 制御負荷対象を半田ごて (L1~L4) とし, 調節計 (DB1000 シリーズ: チノー) からの PWM 信号を, SSR パルス変換ユニットを経て SSR に供給した. Fig. 11 は試験装置の構成を示す. ハンダごての温度を K 型熱電対により各調節計へフィードバックし, 閉ループを構成している. なお, 調節計の制御アルゴリズムは標準的な PID 制御アルゴリズムとした. 試験では, 基本型および補償型のアルゴリズムに関して, 同時点弧軸数 AXmax をパラメータとし, 目標温度を (1) 20°C→50°C, (2) 50°C→100°C, (3) 100°C→50°C と 3 段階に 10 分間隔で変化させ, それぞれの場合の負荷の温度応答, と総積算電力量を計測した.

Fig. 12 は, 負荷 L4 の温度応答特性を示す. 閉ループ制御を行っているため, 制御系の特性は基本的に大きく変動することはない. しかしながら, AXmax の設定値によっては少なからぬ変化が観測された. 基本型および補償型ともに, AXmax が増加するにつれて電力抑制を行わない AXmax = 100% の応答に近づいていくことがわかる. また, 基本型は AXmax が減少するにつれて応答が遅くなる傾向を示すのに対して, 補償型は AXmax = 50% までは大きく応答が遅れることはない. ただし, AXmax = 25% では, 補償型の応答には大きなオーバーシュートが観測された.

Fig. 13 は, 昇・降温過程毎の総積算電力量を示す. 同図より, 総積算電力量は基本型と補償型ともに電力抑制を行わない (AXmax = 100%) 場合と大きく変わらないことがわかる. Fig. 9 に示した, 開ループにおける同特性とは大きく異なるが,

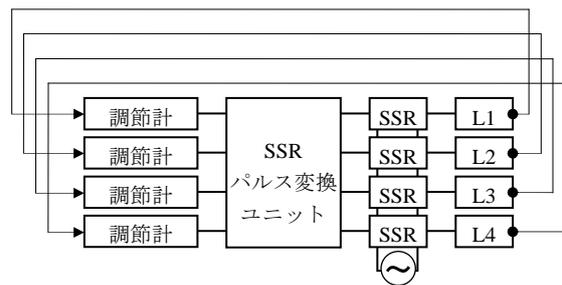
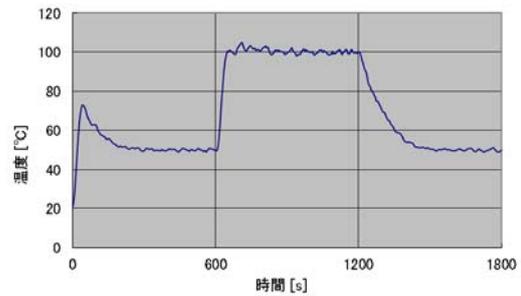
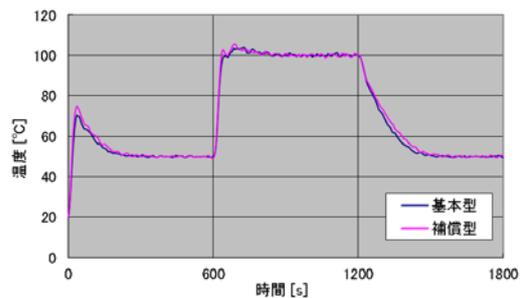


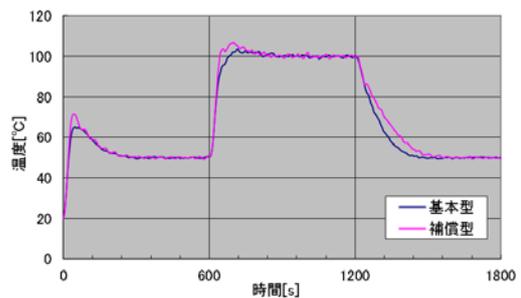
Fig. 11 閉ループ試験装置の構成



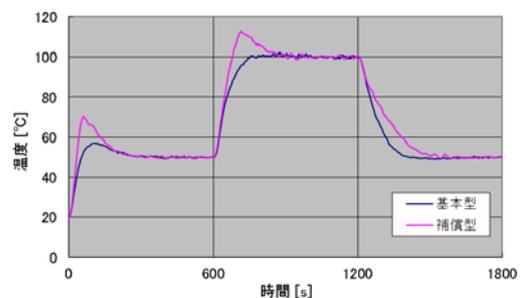
(a) AXmax = 100%



(b) AXmax = 75%



(c) AXmax = 50%



(d) AXmax = 25%

Fig. 12 負荷 L4 の温度応答特性

これは閉ループによるフィードバック処理の効果と思われる。

Fig. 14 は、AXmax をパラメータとした立ち上がり時間特性を昇・降温過程毎に示す。昇温過程 (1 および 2) では、電力制御を行わない場合 (AXmax = 100%) に比べて基本型では AXmax = 75%以下で、補償型では AXmax = 50%以下で遅れが観察される。特に基本型では AXmax = 25% の場合大幅な遅れが生じている。一方、降温過程 (3) では、逆に基本型の AXmax = 25% が最も速い応答を示した。これは、降温過程では、電力抑制アルゴリズムにより電力供給をより素早く減少させることが出来たためと考えられる。

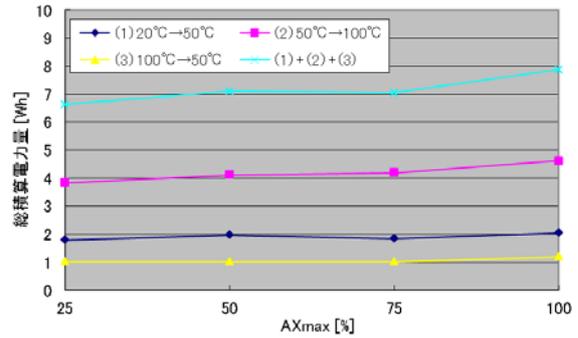
#### 4. まとめ

以上、多ループ制御系における SSR 点弧制御方式に関して報告した。提案した点弧制御アルゴリズムは、ピーク電力を制御対象のループ数に応じて抑制することができる。

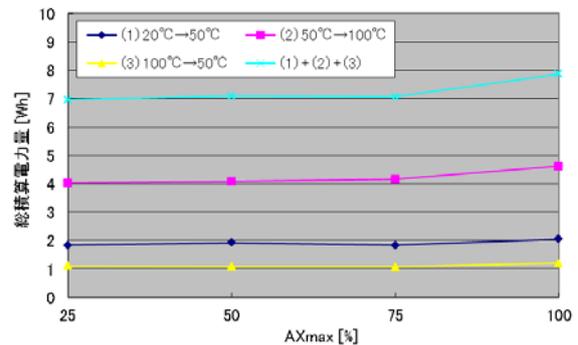
開ループ制御系においては応答特性の低下が見られるが、補償要素を加えたアルゴリズムでは、制御性能をある程度維持できることが示唆された。また、閉ループ制御系においては、電力抑制を行わない場合と同程度の制御性能を示した。これらの結果は、いずれの場合もピーク電力が 75% 以下に抑制された上でのことであり、本方式は多ループ制御系における SSR 点弧制御方式の省エネルギー化に貢献できると思われる。また、本方式は既存の設備に容易に追加できるため、導入コストも低く抑えることができると考えられる (特許出願中)。

#### 参考文献

1) 大嶋健志, 電力ピーク対策の円滑化とトップランナー制度の拡充, 参議院調査室作成資料, 2012



(a) 基本型



(b) 補償型

Fig. 13 目標温度毎の総積算電力量

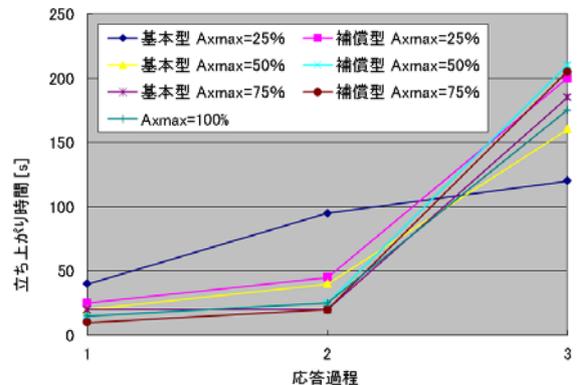


Fig. 14 AXmax 対立ち上がり時間特性

2) 計装ネットワークモジュール NX 仕様書, CP-SS1869, アズビル株式会社, 2012

3) 岩田利王, dsPIC 基盤で始めるデジタル信号処理, CQ 出版社, 2009

4) 後閑哲也, 電子制御・信号処理のための dsPIC 活用ガイドブック, 技術評論社, 2006

5) 後閑哲也, C 言語による PIC プログラミング, 技術評論社, 2002