

PID温度制御における総電力抑制制御

A Total Power Control Technology PID Temperature Controllers

アズビル株式会社
技術開発本部

田中 雅人
Masato Tanaka

アズビル株式会社
アドバンスオートメーションカンパニー

高木 亨
Toru Takagi

キーワード

温度制御, PID 制御, 汎用調節計, 加熱装置, 総電力, 電気ヒータ

産業界において広く利用されている加熱装置は、電力使用量の特に大きな装置である。ゆえに、電力供給事情や電力設備事情などにより、加熱装置の電力使用量の上限を、加熱装置が本来備える最大量よりも低く抑えるように管理されることが多い。この場合、加熱性能に影響が出ることは避けられない。そこで、複数のPID温度制御系の総電力が、指定された一定値を超えず、かつ設定値への追従特性が可能な限り損なわれないように、PID温度制御を行う総電力抑制制御技術を開発したので報告する。

The heating systems which are widely used in the industrial world consume a tremendous amount of power. For this reason a limit that is lower than the system's actual capacity is often set on power consumption in order to suit the company's power supply and equipment situation. This inevitably affects the system's heating performance. We have therefore developed a total power control technology which prevents the overall power consumption of a system of several PID temperature controllers from exceeding the set value, while at the same time maintaining a high level of tracking performance so that the temperature stays close to the set value.

1. はじめに

加熱装置(半導体製造・熱プロセス装置、プラスチック成型機、食品殺菌滅菌装置など)には、加熱温度を適正に制御するために、PID制御を実行する専用ハードウェアとして、汎用調節計(温調計)が広く活用されている。そして、制御の対象になる電気ヒータは、この制御動作次第で使用電力が大きくなり小さくなる。

本論文では、汎用調節計が複数の電気ヒータを利用する温度制御系に適用される際に、最大使用電力の抑制(総電力抑制)を狙う制御技術を紹介する⁽¹⁾。

2. 電気ヒータを使用する加熱装置の課題

2.1 汎用調節計に課せられる制約

汎用調節計は、主に産業界から産業界に販売されるいわゆるBtoBの製品であり、汎用調節計メーカーから製造装置メーカー、エンドユーザーへと大量に流通する制御技術である。この場合、厳密にはBtoBtoBになるのであるが、汎用

量製品としての流通形態を取りながら、その「流通できる制御技術」でなければならないという制約の中で、制御のソリューションを実現している⁽²⁾。

さて、その実用上の制約であるが、汎用調節計は「大量に流通する制御技術」なので、PIDというスタンダードな制御方法をベースとして、熱電対や測温抵抗体という一般的な計測装置と組合せたシングルループの制御系を構成するための「コントローラ製品」であることが前提になる。そして、PIDをベースにその高機能化を進める場合、その高機能化によってこの前提が大きく損なわれることがあってはならない。本論文で紹介する総電力抑制制御は、この前提条件(流通適合性)を考慮して開発されている⁽³⁾。

2.2 最大消費電力に関する課題

東日本大震災による原子力発電所の事故以来、電力危機への対応は特に重要な緊急課題になり、工場や生産ラインの電力使用量管理が強く求められるようになった。工場内の加熱装置は特に電力使用量の大きな設備装置であるため、電力使用量の上限を、本来備える最大量よりも低く抑

えるように管理されることが多い。例えば電力を使用する設備装置では、デマンド管理システムからの指示により、特定の電力使用量以内に制限する運用が行われている。

加熱装置メーカーとしては、最大消費電力を、加熱装置ユーザが要求する上限に合わせることで、受注機会を確保することにも繋がる。例えば図1のように8箇所の事業所から、性能や大きさがほぼ同じ加熱装置が導入計画されるとする⁽¹⁾。ただし、図1に示す電力が、各事業所の電力管理の実績や事情から、厳格に指定される許容可能な加熱装置の最大電力であるとする。仮に加熱装置メーカーから提供可能な標準の加熱装置製品が、35kWの最大消費電力というように設計されていたとすれば、8箇所の事業所のうち4箇所は受注機会を逸することになり得る。

加熱装置ユーザ（事業所側）としては、許容可能な加熱装置の最大電力が40kWであったときに、35kWの加熱装置を問題なく導入していたとする。設置エリアの変更や電力デマンド対応の事情などにより、許容可能な最大電力が32kWに変更になったときに、この導入済みの35kWの加熱装置に関する運用が、厄介な課題になる。

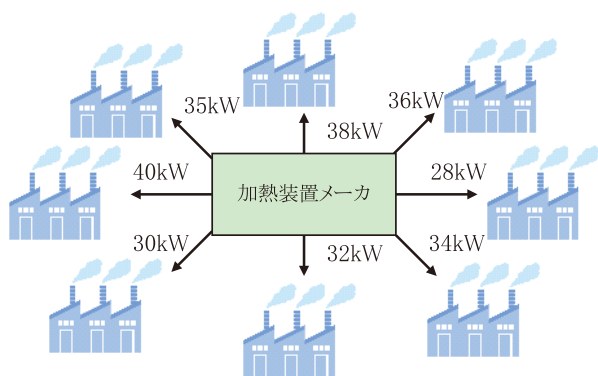


図1 ユーザにより異なる最大電力要求

2.3 解決すべき技術課題

従来、複数の電気ヒータを備える加熱装置(例えば図2のような加熱装置)を対象として⁽¹⁾、装置の立ち上げ時(複数の電気ヒータ領域の一斉昇温時)に同時供給される総電力を抑制するために、所定の立ち上げ順序に従って各熱処理部を順次立ち上げていく手法などがある。しかし、製造装置では、時間差を与えて立ち上げる場合、立ち上げに要する時間や電力にはばらつきが必ずあるため、余裕のある時間差を与えて立ち上げの切替判断をする必要がある。したがって、例えば3系統の加熱制御系を備える加熱装置を立ち上げる場合に、別々に順次立ち上げていくと、結果的に1系統の立ち上げ時間を単純に3倍した時間以上の時間が使われることになる⁽⁴⁾。

本論文で紹介する総電力抑制制御は、複数の温度制御系を対象とし、例えばステップ応答制御(設定値SPのステップ変更が行われ、その追従制御として継続的に大電力が利用されている昇温状態)において、総電力が指定された一定値(割当総電力PW)を超えないように、かつ設定値SPへの追従特性が可能な限り損なわれないように、ステッ

プ応答制御が行なわれる技術である。また、加熱装置メーカーから世界各地のユーザへと大量に流通する技術であることを考慮し、出力上限の操作のみによる実現形態とした。これにより、PID制御ループの周波数応答特性が恒常的になり、使いやすさが向上する。

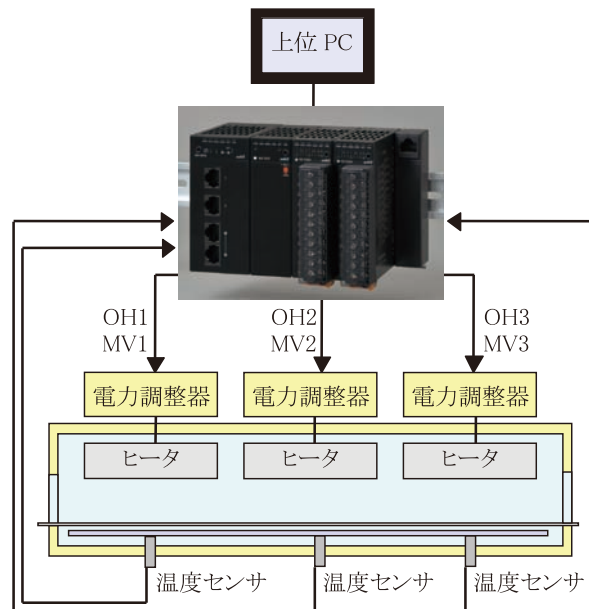


図2 加熱装置内の複数ヒータ系

3. 総電力抑制制御アルゴリズム

3.1 設計指針

加熱装置で時間差を与えて順次立ち上げると、結果的に電力に余裕のある時間帯が生じることは避けられず、それが立ち上げ完了を遅らせる非効率分になる。単純に言えば、設定値SPのステップ変更が行なわれた際に、設定値SPへの追従制御が行われていない状態を多く発生させていることになる。

またループ間干渉のある加熱系では、先に立ち上げ完了したループに、後から立ち上がるループからの干渉による昇温外乱が発生するので、整定までに余計な時間がかかり非効率になる。したがって、総電力を一定値以内に抑えて同時昇温しながら、極力同時に昇温を完了するように「完了のタイミング」を合わせることが、最も効率的な立ち上げ方になる。ゆえに、総電力を一定以下でかつ理想的には割当総電力に余裕を持たない動作にする必要がある⁽⁴⁾。

3.2 処理フロー

処理フローの概略を、以下に示す⁽⁴⁾。

- ① 割当総電力 PW を入力する。
- ② リアルタイムに計測されている総電力実測値 PR を入力する。
- ③ 総電力実測値 PR と割当総電力 PW を比較し、総電力実測値 PR が割当総電力 PW より大きいと判定された場合に、補正係数 HS が現時点の数値よりも小さくなるように更新する。

IF PR > PW THEN HS ← 0.99 HS

- ④ 各制御ループ*i*に対応する操作量 MVi に基づき、電力が最大状態に到達していると見なされる状況であるか否かを判定する。さらに総電力実測値 PR と割当総電力 PW を比較し、総電力実測値 PR が割当総電力 PW より小さいと判定された場合に、補正係数 HS が現時点の数値よりも大きくなるように更新する。
 $IF\ MV_i = OH_{xi}\ AND\ PR < PW$
 $THEN\ HS \leftarrow 1.001\ HS$
- ⑤ 各制御ループ*i*に対応する最大出力時電力値 $CTmi$ を入力する。ただし、最大出力時電力値 $CTmi$ は予め記憶されている固定値とする。
- ⑥ 各制御ループ*i*に対応する電力余裕 $CTri$ を、次式により算出する。
 $CTri = CTmi (100.0 - MV_i) / 100.0$
- ⑦ 最大総電力 BX を、次式により算出する。
 $BX = \sum CTmi = CTm1 + CTm2 + \dots + CTmn$
- ⑧ 電力余裕総量 RW を、次式により算出する。
 $RW = \sum CTri = CTr1 + CTr2 + \dots + CTrn$
- ⑨ 電力削減総量 SW を、次式により算出する。
 $SW = BX - PW$
- ⑩ 各制御ループ*i*に対応する電力削減割当量 $CTsi$ を、次式により算出する。
 $CTsi = SW (CTri / RW)$
- ⑪ 各制御ループ*i*に対応する出力上限値 OH_i を、次式により算出する。
 $OH_i = \{ 1.0 - (CTsi / CTmi) \} 100.0 [\%]$
- ⑫ 出力上限値 OH_i を、次式により補正する。
 $OH_{xi} = OH_i HS$
- ⑬ 各制御ループ*i*に対応する設定値 SP_i と制御量 PV_i を入力し、操作量 MV_i を、以下のPID制御演算により算出する。
 $MV_i = (100.0 / PB_i) \{ 1 + (1 / TI_i s) + TD_i s \} (SP_i - PV_i)$
 PB_i : 比例帯
 TI_i : 積分時間
 TD_i : 微分時間
- ⑭ 操作量 MV_i を出力上限処理する。
 $IF\ MV_i > OH_{xi}\ THEN\ MV_i = OH_{xi}$
- ⑮ 操作量 MV_i を出力する。

3.3 調節計実装例

汎用調節計への実装事例を図3に示す。調節計は当社製の計装ネットワークモジュールNXである。総電力抑制制御アルゴリズムはスーパーバイザーモジュール側に実装され、PID制御アルゴリズムについては調節計モジュールが標準的に備えるものを利用する形態としている。すなわち、実用性を追求した結果として、本技術は汎用的なコントローラ製品に対して外付的に拡張する形態が可能なのである。

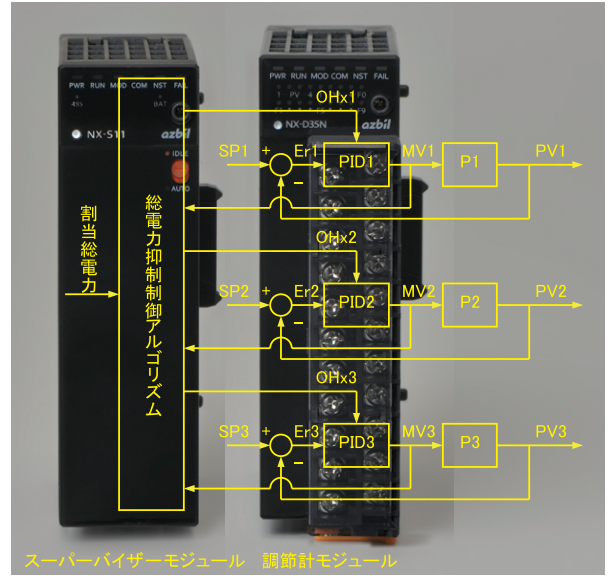


図3 汎用調節計への実装事例

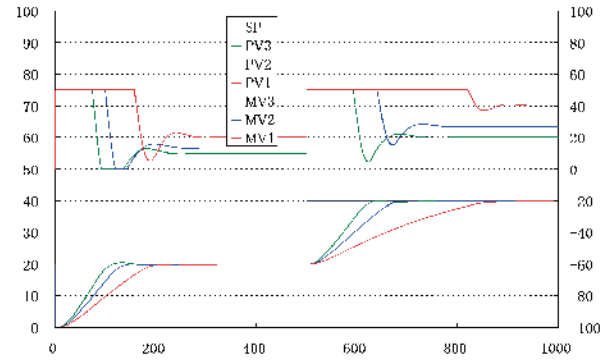


図4 出力上限値 OH を固定した場合の昇温

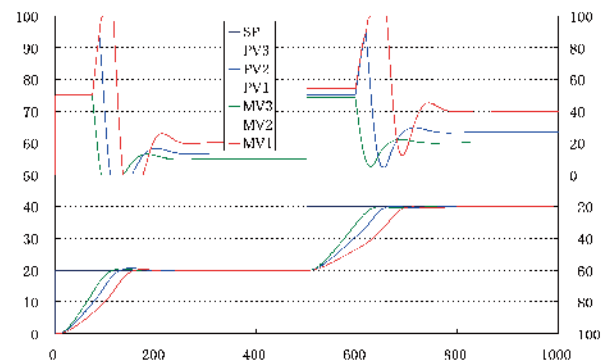


図5 総電力抑制制御の可変 OH による昇温

4. 総電力抑制制御の動作例

4.1 典型的動作(ステップ応答)

3ループの制御系で、割当総電力PWを一定としたステップ応答シミュレーション結果を図4、図5に示す⁽¹⁾。左軸は温度SP, PV1, PV2, PV3(図中下側のグラフ)の%単位の表示, 右軸は操作量MV1, MV2, MV3(図中上側のグラフ)の%単位の表示, 横軸は時間sec.単位である。

図4は出力上限値OHを一定値50%に固定した場合の昇温であり, 特に操作量MV1, MV2, MV3が高くなる高温域の昇温(図中後半)において, 温度PV1の昇温が出力不足により劣化する。

図5は総電力抑制制御の可変OHによる昇温であり, 温度PV2, PV3の昇温が完了し操作量MV2, MV3が下降するのに伴い, 操作量MV1が上昇するので, 温度PV1の昇温の劣化は解消される。この操作量の下降と上昇の同時発生の際も, 割当総電力PWを維持するような配分になる。

4.2 比較のための動作(ランプ応答)

別な観点で総電力抑制制御の動作を説明するために, 3ループの制御系で, 割当総電力PWを一定としたランプ応答シミュレーション結果を図6, 図7に示す⁽¹⁾。図6, 図7ともに上の図の左軸は温度SP, PV1, PV2, PV3(図中ランプ動作のグラフ)の%単位の表示, 右軸は電力WのW単位の表示, 横軸は時間sec.単位である。また, 図6, 図7ともに下の図の左軸は操作量MV1, MV2, MV3の%単位の表示, 横軸は時間sec.単位である。

図6は出力上限値OHを一定値50%に固定した場合の昇温であり, この場合はヒータ総容量600Wの50%の300Wが割当総電力になっている。ランプ動作により徐々に操作量が上昇しながら, 出力上限値OH=50%に到達するとそれ以上には操作量は上昇しないので, 総電力が300Wを超えることは絶対にないように制限されている。しかし, 実際には出力上限値OH=50%に到達しない操作量もあるので, 総電力自体は最高で250Wまでしか上昇しない。すなわち, 割当総電力の300Wに対し十分に余裕がありながら, 一方で操作量の上昇が制限されるという現象が発生する。図6では, この現象により特に温度PV1の昇温が極端に劣化してしまう(時刻300sec.~800sec.)。

図7は総電力抑制制御の可変OHによる昇温であり, 出力上限値OHがランプ応答中に常に変化することで, 不必要な操作量抑制は発生しない。実際の総電力が割当総電力の300Wに達する500sec.付近で, 全ての操作量が出力上限値OHに同時に到達する。すなわち, 総電力が割当総電力の300Wを超えることはないのと同時に, 電力に余裕があれば操作量の上昇は制限されない。

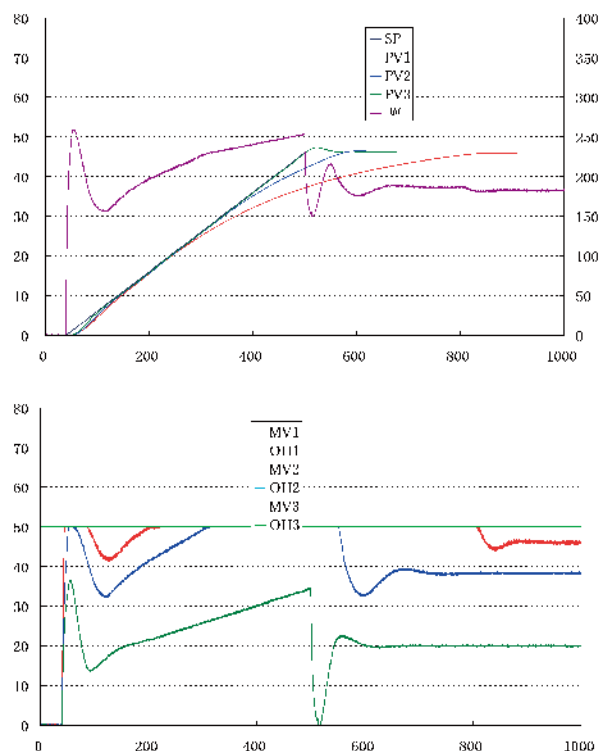


図6 出力上限値 OH を固定した場合の昇温
(上)温度 PV と電力 W (下)操作量 MV, OH

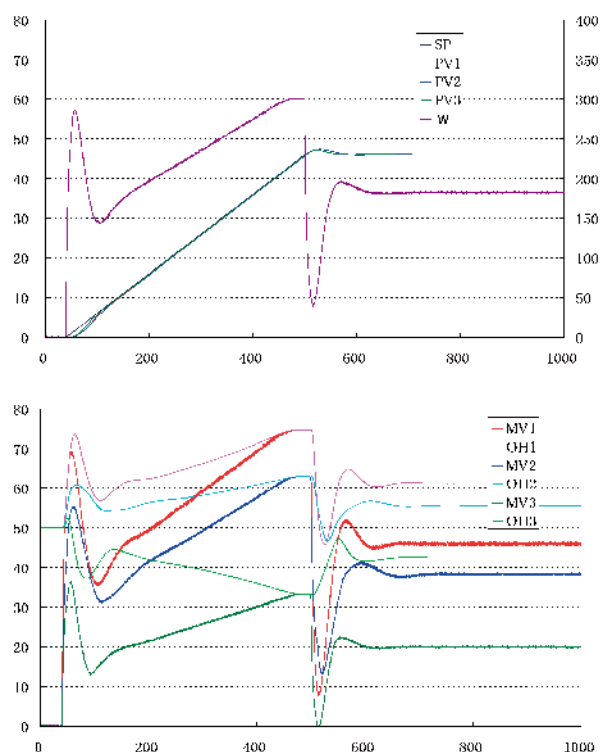


図7 総電力抑制制御の可変 OH による昇温
(上)温度 PV と電力 W (下)操作量 MV, OH

4.3 実対象実験による検証

次は実対象(加熱実験装置)への適用結果を示す。図8, 図9は, 3ループ(400W×3=1200W)の制御系で割当総電力PWを一定(850W=約70%)としたステップ応答結果である⁽¹⁾。左軸は温度SP, PV1, PV2, PV3(図中上側のグラフ)の℃単位と操作量MV1, MV2, MV3(図中下側のグラフ)の%単位の表示, 右軸は電力実測値WのW単位の表示, 横軸は時間sec.単位である。

図8は出力上限値OHを一定値70%に固定した場合の昇温である。操作量が出力上限値OH=70%に制限されたままそれぞれ以上に上昇できず, これに対応する温度が設定値

SPに最後まで到達できないという最悪の状況が発生している。

図9は総電力抑制制御の可変OHによる昇温である。昇温開始前の操作量の高低差から自動決定される出力上限値の高低差の効果により, 昇温開始時点で操作量が80%以上になるものと50%以下になるものがあり, 昇温進捗のタイミングも調整される。そして, 昇温完了の速い制御ループの操作量が下降すれば, 総電力が850Wを超えない範囲で電力配分が調整され, 昇温未完了の制御ループの操作量が上昇する。これにより, 全ての温度が設定値SPに問題なく到達する。

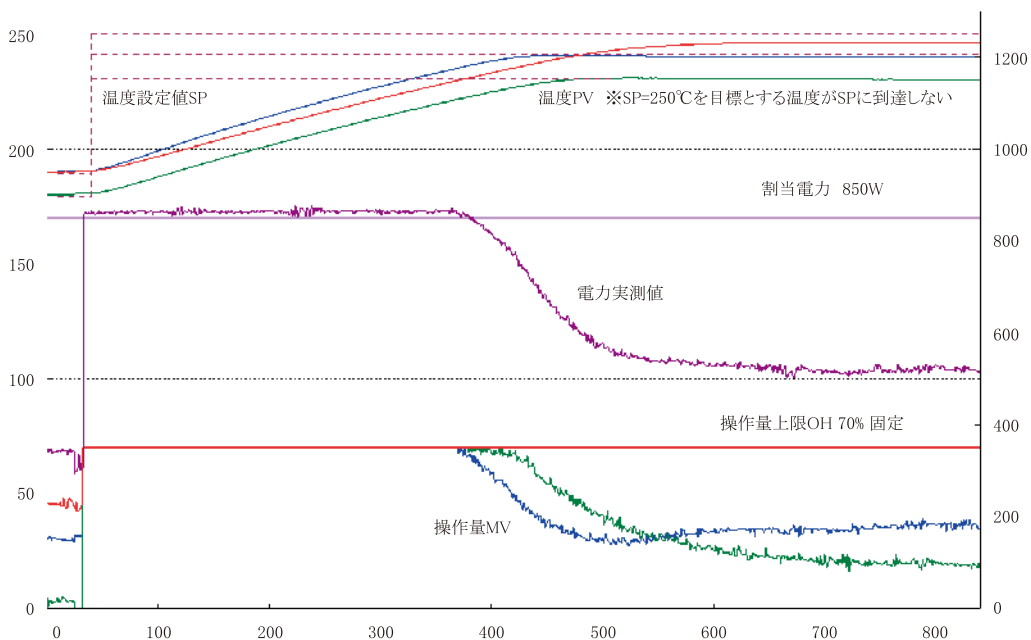


図8 出力上限値 OH を固定した場合の昇温

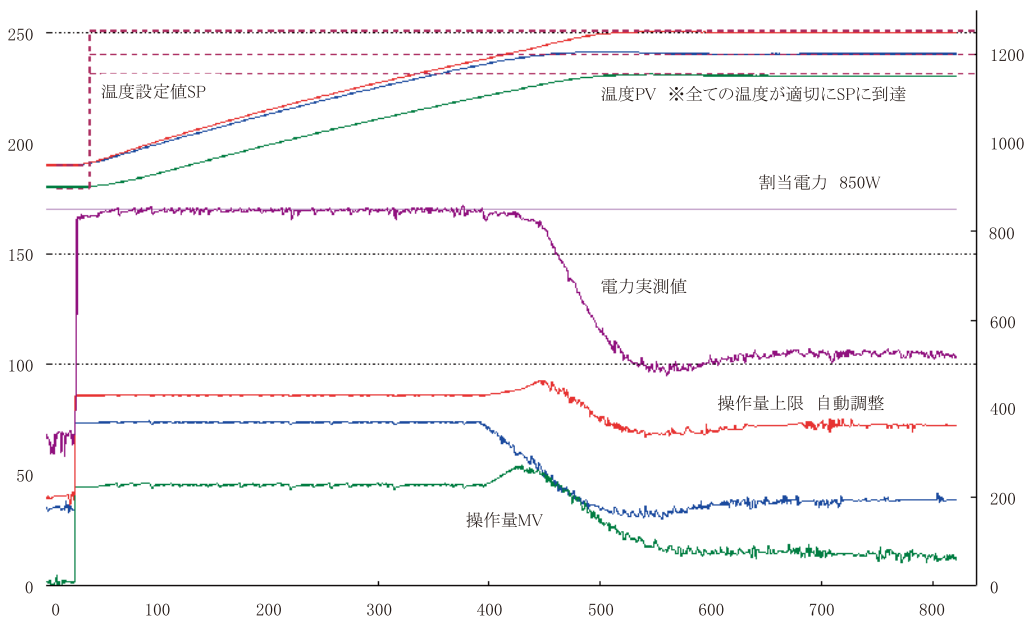


図9 総電力抑制制御の可変 OH による昇温

4.4 省エネルギーの効果について

総電力抑制制御は、装置内最適化の制御であるが、この制御をもって省エネルギー効果を得るとは言い難い。いわゆる電力の平滑化によりループレベルの制御にデメリットが生じ難くすることが目的であり、ゆえに上位側(装置間最適化)でのデマンドレスポンス制御を実施しやすくするためのものである。

その意味では、生産ラインの総エネルギー統括管理システムとの連携が重要になる。特に注意を要するのは、極端に割当総電力が低くなり過ぎないようにすることである。総電力抑制制御は、割当総電力を低くしても制御の非効率を最小限に留めようということであるが、昇温時間が長くなることに変わりはない。昇温時間が長くなれば、それだけ装置が稼働状態に入るまでの放熱時間は長くなるので、省エネルギー的には不利になる。

このように、制御の階層によって役割を分担していくという思想を、メーカとユーザが業界横断的に共有していくことが、産業界での普及に不可欠な要素になるであろう。

5. おわりに

ループレベルのコントローラである汎用調節計により、加熱装置内の電力コントロールに貢献する技術として、総電力抑制制御を紹介した。

総電力抑制制御は、出力上限操作によりループ間の協調動作を与えるものであり、制御対象の特性が変化しない限りは、閉ループ特性(周波数特性)は恒常的になるように設計されている。

あくまでも温度制御が主役であり、温度制御が安定的に動作し、現場で誰でも安心して利用し続けられることが、ループレベルのコントローラである汎用調節計の最優先の使命である。本論文で紹介した総電力抑制制御については、その設計思想についても理解していただければありがたい。

<参考文献>

- (1) 田中雅人：PID 温度制御における総電力抑制技術，工業加熱，2013年，V01.50, No.6 pp.13-18, 日本工業炉協会
- (2) 濱根洋人，松永信智，田中雅人，南野郁夫，宮崎一善：汎用調節計の産業動向と新技術，電気学会技術報告書，2010年，第1180号，電気学会
- (3) 田中雅人：制御技術のビジネス的側面に関する考察，計測と制御，2013年，V01.52, No.5 pp.413-418, 計測自動制御学会
- (4) 田中雅人，三浦真由美：エネルギー総和抑制制御装置，電力総和抑制制御装置および方法，2012年，特開2012-048370

<著者所属>

田中 雅人 技術開発本部商品開発部
高木 亨 アドバンスオートメーションカンパニー
営業本部営業4部