

多チャンネル高精度 AC ゼロクロススイッチ制御における高力率化

学籍番号 23413501 氏名 青木 豪

指導教員名 米谷 昭彦

1 はじめに

精密機械工業や半導体製造においてマイクロマシンやナノマシンなどの微細加工技術が進行している近年では、電力（温度）制御の高精度化の要求が高まっている。また電気機器の消費電流に高調波が発生してしまうことにより、誤作動や誤制御などの悪影響を及ぼすといった問題がある。こうした背景から高調波電流規制が試行され、世界的に高調波電流抑制のニーズが高まっている。また、実際の温度制御系は多チャンネルを同時に制御する用途が多い。その際の設定の電源容量は最大電力によって決まるため、電力平滑化によって電源容量を小さく設定できる。電力平滑化の度合いは力率を指標として評価することができ、電力のばらつきが少ないと力率は高くなる。従って、最大電力を抑えるために高力率電力制御が望まれる。

本研究では図1のように on-off パルス信号によって半導体スイッチを制御し、印加電圧を調整する商用電源と抵抗性ヒータを用いた温度制御系を想定し、高調波成分が少なく高精度・高力率な電力制御の実現を目的としてゼロクロス制御に $\Delta\Sigma$ 変調を適用させる制御手法を提案する。

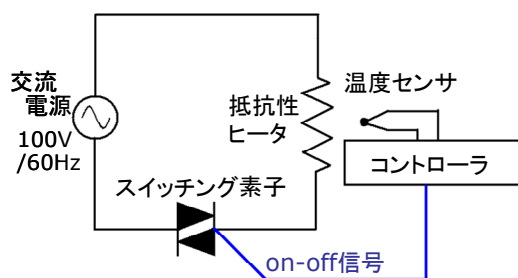


図1：温度制御系の簡略図

2 ゼロクロス制御とは

ゼロクロス制御とは交流電源のゼロクロス点ごとに on-off を切り替えるスイッチングを行い、負荷に印加する電圧を制御する方式である。

ゼロクロス制御の出力波形は連続しているために、消費電流に含まれる高調波成分が少ないというメリットがある。しかし、ゼロクロス制御はその変調原

理から、遅れの少ない制御周期で制御しようとする
と分解能が低くなってしまいう問題点があるため電力制御の高精度化が難しい。

3 $\Delta\Sigma$ 変調とは^[1]

ゼロクロス制御では電力制御の高精度化が難しいという問題点があるため、本研究では $\Delta\Sigma$ 変調という手法を用いて実効的な出力分解能の向上を図る。

$\Delta\Sigma$ 変調とはノイズシェーピングフィルタによって量子化ノイズを周波数整形して、信号帯域内のノイズを外に掃き出すことで信号帯域内の量子化ノイズを低減させる手法である。ノイズ整形のされ方はノイズシェーピングフィルタによって決まる。

4 $\Delta\Sigma$ 変調を用いたゼロクロス制御

図2に本研究で用いるパルス密度変調器のブロック線図を示す。温度調節のための変調指令値が0~1の連続値でシステムに入力され、スイッチング制御のために0 (off) か1 (on) のという2値の制御信号にパルス密度変調を行なう。

本研究では遅延の少ない制御のため、電源の4サイクルを制御周期とするゼロクロス制御を考える。

1 制御周期で表現できる on-off パターンは $2^4=16$ パターン存在する。しかし、ゼロクロス制御のみの場合ではその原理上、制御周期中の on の数のみしか意味を持たないため、出力を5パターンでしか表現できない。ここでゼロクロス制御に $\Delta\Sigma$ 変調を適用すると、各 on-off パターンに対するノイズシェーピングフィルタ通過後の出力は全て異なる。つまり $\Delta\Sigma$ 変調を用いることによって実効的な出力分解能を大きく向上させることができるのである。

ノイズシェーピングフィルタと on-off パターンを先に設定すると、そのパルスパターンをノイズシェーピングフィルタに入力したときの出力への寄与を予め計算することが可能である。出力結果を数値データとして纏めておき、そのデータを基に制御周期ごとに最も量子化ノイズの少なくなる on-off パター

ンを選択して出力することで量子化ノイズを低減できる。さらに本研究では、電源サイクルごとに量子化ノイズの再評価と on-off パターンの再選択を行うことで制御遅延の短縮を試みる。

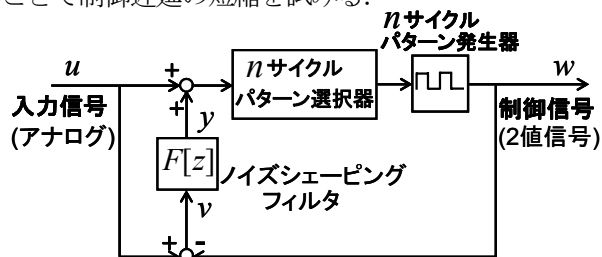


図2：提案するシステムブロック線図

5 提案手法による温度揺らぎの低減結果

時定数の短い温度制御系にゼロクロス制御を適用した場合、一定の目標値を入力しても制御量には微小な揺らぎが発生してしまう。実機への適用の際に求められるのはこの温度揺らぎを極力抑えることである。実機を想定して、PIDコントローラと提案するパルス密度変調器と制御対象を組み合わせたモデルを用いてシミュレーションによって温度揺らぎを評価した。PIDパラメータは $K_p = 1$, $T_I = 30[\text{s}]$, $T_D = 3[\text{s}]$ として、制御対象の伝達関数は $1/(10s+1)(s+1)$ とした。ステップ信号を目標値として入力した結果、一般的なゼロクロス制御の場合と比べて提案手法はあらゆる目標値に対して温度揺らぎを約1/4~1/2倍に低減できることが分かった。また、実機を用いた検証でも提案手法の温度揺らぎ低減効果を確認することができた。

従来法では、時定数の短い制御対象に対して大きな温度揺らぎが発生してしまう可能性があったが、提案法ではその可能性を抑えることができる。

6 電力平滑化

本研究では、許容する負荷の総和を先に決め、各チャンネルに出力を確定するための優先順位を設ける電力平滑化アルゴリズムを提案する。

予めそれぞれのチャンネルの負荷の抵抗値を測定し、抵抗値の逆数を各チャンネルの負荷として負荷が最大のものが1になるように正規化しておく。許容する負荷の総和は、各チャンネルの操作量とノイズシェーピングフィルタ通過後の出力の和に、各チャンネル負荷を掛けた値の平均値によって決める。

計算システム工学分野
また4ステップ後に量子化ノイズが最大になるチャンネルに重点を置いて、ノイズシェーピングフィルタ通過後のフィルタ出力の絶対値が大きいチャンネルから順に優先順位を高くする。実働の際は、優先順位の高いチャンネルから出力を確定していき、許容する負荷の総和を超える場合はそのチャンネルの出力を0 (off) にする。

実機を用いて提案する電力平滑化アルゴリズムの効果を評価した。252[°C]のステップ信号を入力した時の総消費電流の時間波形の例を図3に示す。図3では電力平滑化無しの場合には消費電流の振幅にばらつきがあるが、電力平滑化アルゴリズムを適用した場合にはパルス密度変調器への入力信号が一定の時には消費電流波形の振幅もほぼ一定である。故に、提案手法によって電力が平滑化されていることが図3から一目瞭然である。また、電力が平滑化されているかの指標として力率を計算した結果、あらゆる目標値に対して平滑化無しの場合よりも力率を高くできることが分かった。従って、提案するアルゴリズムにより電力を平滑化する高力率電力制御を実現したと分かる。

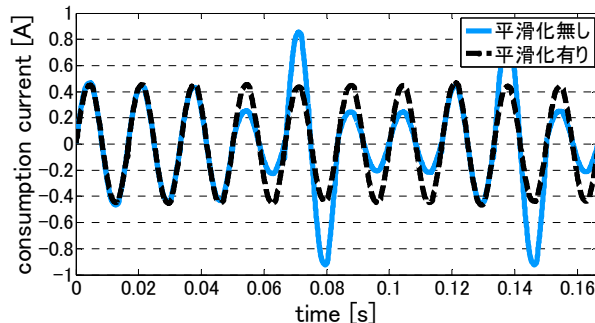


図3：電力平滑化の効果（総消費電流の時間波形）

7 まとめ

本研究では高調波成分が少なく、高精度で高力率な電力制御を行うことを目的として、 $\Delta\Sigma$ 変調をゼロクロス制御に適用するというアプローチを試みた。その結果、高調波電流抑制の効果をそのままに低分解能という短所を改善し、電力平滑化によって最大電力を抑える高精度・高力率電力制御を実現した。

8 参考文献

- [1] 山崎芳男 “高速 1bit 信号処理” JAS Journal, 37 巻, 5 号, pp. 21-28, 4 月号臨時増刊 (1997)