

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	$\Delta \Sigma$ 変調に基づいたPWM 変換に関する研究
Title(English)	Study on pulse width modulation conversion based on delta-sigma modulation
著者(和文)	李蔚波
Author(English)	weibo li
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9551号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:黒澤 実,中村 健太郎,杉野 暢彦,篠崎 隆宏,中本 高道,樋口 俊郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9551号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	李 蔚波
論文審査 審査員		氏 名	職 名	
	主査	黒澤 実	准教授	中本 高道 教授
	審査員	中村 健太郎	教授	樋口 俊郎 東京大学 教授
		杉野 暢彦	准教授	
		篠崎 隆宏	准教授	

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は「 $\Delta\Sigma$ 変調に基づいた PWM 変換に関する研究」と題し、7 章からなっている。

第 1 章「序論」では、従来のマルチビットデジタル制御システムを 1 ビットデジタル制御システムへと置き換えることの可能性を紹介している。しかし、1 ビットデジタル制御システムの実現には、パワー段における半導体素子のスイッチング速度に問題があることを指摘し、1 ビット信号を PWM(Pulse Width Modulation) 信号に変換する必要性を述べている。既存の変換方法とその問題点を指摘し、本研究の意義を明らかにしている。

第 2 章「 $\Delta\Sigma$ 変調に基づいた自励発振 PWM 変換器」では、ヒステリシスコンパレータを導入した $\Delta\Sigma$ 変調に基づいた自励発振 PWM 変換器を提案し、動作原理の解析や出力の検証を行っている。また、PWM 信号のスペクトル解析により $\Delta\Sigma$ 変調特有のノイズシェーピング特性を確認し、ヒステリシスコンパレータのヒステリシス幅とスイッチング周波数の間には線形関係があることを明らかにしている。さらに、高精度な PWM 信号を得るために、2 段の積分器を有する 2 次自励発振 PWM 変換器を提案している。しかし、動作の安定化のため、PI 補償（比例：Proportional, 積分：Integral）の必要性を指摘している。

第 3 章「自励発振 PWM 変換器の安定性」では、PI 補償付き 2 次自励発振 PWM 変換器の安定性を考察するために、PI 補償パラメータの調整により開ループ特性の位相余裕が改善する効果を調べている。また、記述関数法を用いてヒステリシスコンパレータの近似伝達関数を求め、リミットサイクルを解析している。この結果、PI 補償付き 2 次自励発振 PWM 変換器の安定化には、比例係数 $K_P=0.1$ 、積分係数の逆数 $T_I=0.5$ が最適なパラメータであるとしている。

第 4 章「自励発振 PWM 変換器の特性」では、1 次自励発振 PWM 変換器および PI 補償付き 2 次自励発振 PWM 変換器の特性を、SN 比と歪率により評価している。入力信号の振幅および周波数に依存して PWM 信号の高調波歪率が変化することを指摘している。また、アップサンプリングもしくは PWM 信号の高周波化による、信号帯域内のノイズ量低減や低歪率化への効果を確認している。例として、サンプリング周波数を 12.5 MHz とし、振幅 0.4 周波数 100 Hz のサイン波を 1 ビット信号に変換後、PI 補償付き 2 次 PWM 変換器に入力し、スイッチング周波数を 500 kHz とした場合、SN 比は 78 dB、高調波歪率は 0.000005% の PWM 信号が得られることを示している。また、より高精度な PWM 信号を生成する変換器の試みとして、PI 補償器を PID 補償に拡張することや 3 次 PWM 変換器の構築や零点シフトによる信号帯域内のノイズ低減等の試みを行っている。

第 5 章「外部キャリア信号による多相同期」では、自励発振 PWM 変換器によって得られる PWM 信号のスイッチング周波数が一定でないため、三相モータ駆動など相間同期を必要とする応用には問題の生ずることを指摘している。そこで外部キャリア信号を導入して、スイッチング周波数をキャリア信号に同期する同期型 PWM 変換器を考案している。三角波をキャリア信号として用い、三角波の傾きと振幅の関係を検討し、最適なキャリア信号形状を明らかにしている。さらに、自励発振 PWM 変換器と同様に高次化による安定性の問題を検討し、PI 補償付き同期型 2 次 PWM 変換器を設計し、比例係数 $K_P=0.1$ 、積分係数の逆数 $T_I=5$ が最適なパラメータであるとしている。

第 6 章「PWM 変換器の実装」では、提案した自励発振 PWM 変換器や同期型 PWM 変換器を FPGA により回路実装を行い、実用性を検証し、回路規模や動作できる最大クロック周波数等を確認している。また、同期型 PWM 変換器をブラシレス DC モータ駆動システムに実装し、リップル電流の低減により、相間の同期効果を検証している。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本論文では $\Delta\Sigma$ 変調に基づく PWM 変換器の提案と回路の安定化に関する理論と実験による研究を行い、その設計手法を明らかにしている。本研究で得られた PWM 変換器の研究成果は工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。