

第 5 章 結論

本論文では DC-DC コンバータにおける負荷急変時の出力電圧の過渡特性を改善するため、負荷電流の微分値を用いたフィードフォワード制御法を提案し、一般的な位相補償回路を有する電圧モード制御の降圧形 DC-DC コンバータに適用した場合について解析、実験を行い、その効果を定量的に検証した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) フィードフォワード制御の適用により、負荷変動に対する出力電圧の過渡応答の改善は可能となるが、その改善度はフィードフォワードパラメータに大きく依存する。
- (2) 出力電圧の偏差を二乗積分した性能指数を過渡応答改善の指標として導入することにより、性能指数を最小とするフィードフォワード制御の最適パラメータが得られる。
- (3) 性能指数を基にしたフィードフォワード制御の最適パラメータにより、出力インピーダンス、過渡応答電圧の振幅値がフィードバック制御のみの場合より大きく改善できる。
- (4) 負荷変動時の負荷電流スルーレート I_{sr} がそれほど高くなく、時比率飽和が生じない範囲では、フィードフォワード制御は極めて有効であり、その有効な制御範囲は、時比率の許容変化幅の上限 ΔD_m と I_{sr} の関係式で示される。

さらに、本方式をより一般的なバルクキャパシタの存在する容量性の負荷に適用した場合、

- (5) 抵抗負荷の場合と同様の設計方法による負荷電流フィードフォワード制御が過渡応答の改善に有効である。
- (6) 抵抗負荷の場合に比べて出力電流の変化が緩やかになり PWM 制御の

時比率の飽和が起こり難くなるため、フィードフォワード制御の有効制御範囲が広がる。ただし、バルクキャパシタの容量にはコストパフォーマンスのよい値が存在し、それ以上の容量にしても過渡応答の改善度はほとんど向上しない。

(7)バルクキャパシタを大きくするとフィードフォワードゲイン K_i に対する安定限界が減少するため、安定性の点からフィードフォワードの過補償については注意する必要がある。

本論文において、負荷電流フィードフォワード制御をフィードバック制御に併用することによるスイッチング電源の動特性の改善、特に負荷急変時の過渡応答に対する1つの改善指針を示した。今後、益々、電子機器の負荷変動時の厳しい電圧条件が電源に対して要求されるものと思われ、この指針がそれらの要求に対して有用になると考える。

なお、本論文においては、入力電圧がレギュレートされた場合を考え、特に負荷の変化に注目して考察してきた。入力電圧変動に対するフィードフォワード制御の特性については、今後の検討課題としたい。また、過渡応答の改善に有効である他の制御方法（例えば、マルチフェーズ制御[47]、アクティブクランプ回路[48]など）との併用についても、今後検討していきたい。

謝 辞

本研究を行う機会を与えて下さり、終始有益なご助言、ご指導頂きました大分大学工学部電気電子工学科 中野忠夫 教授に心から感謝の意を表わします。また、この研究題目を与えられ、本研究遂行にあたって、終始ご指導ご鞭撻頂きました電気電子工学科 鍋島 隆 助教授に心から感謝致します。

九州大学大学院システム情報科学研究院・電気電子システム工学部門 二宮 保 教授、大分大学工学部・生産システム工学科 岡田英彦 教授、電気電子工学科 田中 充 教授には、本論文を閲読して頂き、有益なご助言を頂きました。ここに謹んで感謝の意を表わします。

なお、本研究の遂行にあたって、いろいろとご面倒頂きました中野研究室の佐藤講師、加来技官に感謝致します。

最後になりましたが、大分大学大学院工学研究科社会人コースに籍を置き研究を続けることを見守って頂きました職場の皆様に深くお礼申し上げます。

文 献

- [1] (社)日本電子機械工業会 スイッチング電源委員会, “スイッチング電源の現状と動向,” (社)日本電子機械工業会, 1999.
- [2] 原田耕介, 二宮 保, 顧 文建, “スイッチングコンバータの基礎,” コロナ社, 1992.
- [3] S.S.Ang, “Power-Switching Converters,” Marcel Dekker, 1995.
- [4] C.R.Paul, “Electromagnetic Compatibility,” John Wiley & Sons, 1992.
- [5] R.Redl, “Improving the Load Transient Response of Switching Regulators –Technical Overview and Literature Review,” ELFI S.A.(Electronic Feasibility Investigations), July 18,1996.
- [6] Intel Application Note AP-523, “Pentium Pro Processor Power Distribution Guidelines,” November 1995.
- [7] Intel Document, Order Number 243408-001, “VRM 8.1 DC-DC Converter Design Guidelines,” May 1997.
- [8] Intel Document, Order Number 245335-001, “VRM 8.4 DC-DC Converter Design Guidelines,” November 1999.
- [9] A.F.Rozman and H.J.Fellhoelter, “Circuit Considerations for Fast, Sensitive, Low-Voltage Loads in a Distributed Power System,” IEEE APEC Proceedings, pp.34-42, 1995.
- [10]Unitrode Application Note U-157, “Fueling the Megaprocessor—a DC/DC Converter Designing Review Featuring the UC3886 and UC3910.”
- [11]G.C.Cchryssis, “High-Frequency Switching Power Supplies,” McGrwa-Hill, 1984.
- [12]Linear Technology Application Note 76, “Opti-loop Architecture Reduces

- Output Capacitance and Improves Transient Response," May 1999.
- [13]Texas Instruments Application Note SLVA034A, "Designing With the TL5001 PWM Controller," September 1995.
- [14]R.Redl and N.O.Sokal, "Optimizing Dynamic Behavior with Input and Output Feed-Forward and Current-Mode Control," Proceedings of Powercon7, pp.H1-1 to H1-16, March 1980.
- [15]R.Redl and N.O.Sokal, "Near-Optimum Dynamic Regulation of DC-DC Converters Using Feed-Forward of Output Current and Input Voltage with Current-Mode Control," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.PE-1, No.3, pp.181-192, July 1986.
- [16]G.K.Schoneman D.M.Mitchell, "Output Impedance Considerations for Switching Regulators with Current-Injected Control," IEEE PESC 1987 Record, pp.324-335.
- [17]金丸, 濱田, 鍋島, 佐藤, 中野, "負荷電流フィードフォワードを用いた DC-DC コンバータの最適設計," 電子情報通信学会技術研究報告, EE97-47, pp.1-6, 平成 9 年 11 月.
- [18]金丸, 鍋島, 中野, "位相補償を有する電圧帰還コンバータのフィードフォワードについて," 電子情報通信学会技術研究報告, EE97-67, pp.21-27, 平成 10 年 2 月.
- [19]S. Kanemaru, T.Hamada, T.Nabeshima, T.Sato, and T. Nakano, "Analysis and Optimum Design of a Buck-Type DC-to-DC Converter Employing Load Current Feedforward," IEEE PESC 1998 Record, pp.309-314.
- [20]金丸, 鍋島, 中野, "フィードフォワード制御を用いた DC-DC コンバータの容量性負荷に対する過渡特性," 電子情報通信学会技術研究報告, EE99-13, pp.23-29, 平成 11 年 7 月.

- [21]金丸, 鍋島, 中野, “負荷電流フィードフォワード制御を用いた DC-DC コンバータの過渡特性について,” 電子情報通信学会論文誌(B), J83-B, No.4, pp.580-588, 平成 12 年 4 月.
- [22]電気学会編, “半導体電力変換回路”, オーム社, 1995.
- [23] N.Mohan, T.Undeland and W.Robbins, “Power Electronics,” 2rd edition, John Wiley & Sons, 1995.
- [24]K.Liu, R.Oruganti and F.C.Lee, “Resonant Switches-Topologies and Characteristics,” IEEE PESC 1985 Record, pp106-116.
- [25]K.Liu and F.C.Lee, “Zero-Voltage Switching Technique in DC/DC Converters,” IEEE PESC 1986 Record, pp.58-70
- [26]K.Liu and F.C.Lee, “Resonant Switches – a Unified Approach to Improve Performance of Switching Converters,” IEEE INTELEC Proceedings, pp344-351, 1984.
- [27]W.A.Tabisz and F.C.Lee, “Zero-Voltage Switching Multi-Resonant Technique a Novel Approach to Improve Performance of High-Frequency Quasi-Resonant Converters”, IEEE PESC 1988 Record, pp.9-17.
- [28]V.Vorperian, R. Tymerski and F. C. Lee, “Equivalent Circuit Models for Resonant and PWM Switches,” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 4, No.2, pp.205-214, April 1989.
- [29]Intel Document, Order Number 272770-002, “Embedded IntelDX2 Procesor,” December 1997.
- [30]Intel Document, Order Number 272771-002, “Embedded Write-Back Enhanced IntelDX4 Processor,” December 1997.
- [31]Intel Document, Order Number 243185-004, “Pentium Processor with MMX

Technology,” June 1997.

- [32]Intel Document, Order Number 243657-003, “Pentium II Processor at 350MHz, 400MHz, and 450MHz,” August 1998.
- [33]電子技術, “最新アナ・デジ回路設計 Q&A,” 日刊工業新聞社, Vol.40, No.6, 1998.
- [34]H.W.Ott, “Noise Reduction Techniques in Electronic Systems,” John Wiley & Sons, 1976.
- [35]R.D.Middlebrook and S.Cuk, “A General Unified Approach to Modeling Switching-Converter Power Stages,” IEEE PESC 1976 Record, pp.18-34.
- [36]J.G.Kassakian, M.F.Schlecht and G.C.Verghese, 赤木 他訳, “パワーエレクトロニクス,” 日刊工業新聞社, 1997.
- [37]V.Vorperian, “Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part I : continuous mode,” IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol.26, No.3, pp.490-496, May 1990.
- [38]V.Vorperian, “Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part II : Discontinuous Mode,” IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol.26, No.3, pp.497-505, May 1990.
- [39]R.Tymerski and V.Vorperian, “Generation, Classification and Analysis of Switched-Mode DC-to-DC Converters by the Use of Converter Cells,” IEEE INTELEC Proceedings, pp.181-195, 1986.
- [40]Texas Instruments Application Note SLVA057, “Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies,” March 1999.
- [41]T.Nabeshima and K.Harada, “Large-Signal Transient Responses of a Switching Regulator,” IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol.AES-18, No.5, pp.545-551, September 1982.

- [42]片山 徹, “フィードバック制御の基礎,” 朝倉書店, 1996.
- [43]中野道雄, 美田 勉, “制御基礎理論,” 昭晃堂, 1998.
- [44]Unitrode Design Note DN-62, “Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current Mode”
- [45]K.Wai and Y.Lee, “Technique for Sensing Inductor and dc Output Currents of PWM dc-dc Converter,” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.9, No.3, pp346-353, May 1986.
- [46]K.Billings, “Switchmode Power Supply Handbook,” 2nd edition, McGraw-Hill, 1999.
- [47]Linear Technology Application Note 77, “High Efficiency, High Density, Poly-Phase Converters for High Current Applications,” September 1999.
- [48]S.R.Sanders, A.Wu,R.Rosseti, “Active Clamp Circuits for Switchmode Regulators Supplying Microprocessor Loads,” IEEE PESC 1997 Record, pp1179-1185.