

スペクトラム拡散を用いたLLC電流共振コンバータのEMIノイズ低減

片山 翔吾*, 大岩 紀行, 小堀 康功, 桑名 杏奈, 小林 春夫 (群馬大学)

EMI Noise Reduction with Spread Spectrum for LLC Resonant Converter

Shogo Katayama*, Noriyuki Oiwa, Yasunori Kobori, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード : LLC 電流共振コンバータ, 電磁妨害, ノイズスペクトラム拡散, リプル低減
 (LLC Resonant Converter, EMI, Noise Spread Spectrum, Ripple Reduction)

1. はじめに

本論文では, LLC 電流共振コンバータにスペクトラム拡散を施し, EMI ノイズ対策を行う手法を提案する. 近年スイッチング電源のスイッチングノイズによる EMI(電磁妨害: Electro Magnetic Interference) は世界的に多くの規制が存在し, 今後ますます厳しくなると予想される. 本提案では, LLC 電流共振コンバータについて, スペクトラム拡散を用い EMI ノイズを低減する. スペクトラム拡散はスイッチング周波数を変調することによりノイズスペクトラムを拡散し, そのピークレベルを抑えることにより EMI ノイズ低減を実現する. しかし, 周波数制御電源の一種である LLC 電流共振コンバータはスイッチング周波数を制御することで出力電圧を調整するため, 周波数変調を施すことは出力電圧リプルの増大の原因となる. 本提案では, 通常固定とするスイッチングパルスのデューティ比を変化させることで出力電圧が変動する点に着目し, 周波数を変調させるとともにデューティ比も変調させることにより出力電圧リプルの増大を抑制する.

2. LLC 電流共振コンバータ

図1に LLC 電流共振コンバータの構成を示す. この回路は2つの MOS-FET(Q₁, Q₂) を直列に接続したハーフブリッジ回路, 共振用コンデンサ C_i, トランス, 出力ダイオードブリッジ, および出力コンデンサ C から構成される. トランスの一次側は, MOS-FET Q₁, Q₂ の接続点と GND 間に共振用コンデンサ C_i およびトランスの一次巻線が直列に接続されている. トランスの二次側にはダイオードブリッジを用いた全波整流回路が接続されており, その後段に平滑コンデンサおよび負荷が接続される. 本方式に用いられるトランスは結合係数を小さくすることで漏れインダクタンスを大きくし, これを共振用インダクタとして利用している. 本方式はリプルが比較的大きいため, 平滑コンデンサは一般に数 mF の素子値のものが用いられる.

LLC 電流共振コンバータは他励式の周波数制御方式スイッチングレギュレータであり, Q₁, Q₂ のスイッチングのデューティ比は 50% と一定として, これらを切り替える周波数を変化させることで出力電圧を制御する. Q₁, Q₂ を駆動するスイッチングパルスは, 出力電圧と基準電圧 V_{ref} の差を誤差増幅器で増幅したものを, 電圧制御発振器 (VCO) に入力することで周波数変換を行うことで生成する.

LLC 電流共振コンバータの動作原理を簡単に説明する.

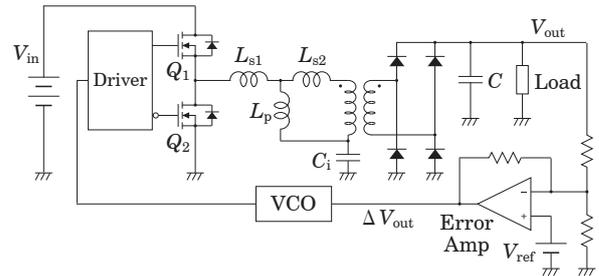


図1 LLC 電流共振コンバータ
 Fig. 1. LLC resonant converter

この回路の共振周波数 f_1 はトランスの励磁インダクタンス L_p , 漏れインダクタンス L_{s1} および共振用コンデンサ C_i の値から次式で表される⁽¹⁾.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_p + L_{s1})C_i}} \dots \dots \dots (1)$$

図2に出力電圧の周波数特性を示す. 共振周波数 f_1 付近では共振電圧が最大となるため, 励磁インダクタ電圧も最大となる. 動作周波数が非常に高くなると, 共振コンデンサ C_i が短絡状態となり, 励磁インダクタ電圧は最低値となる. スwitching周波数は共振周波数 f_1 以上を用いる必要があり, f_1 以下に低下すると貫通電流により Q₁ および Q₂ が破壊する⁽²⁾. LLC 電流共振コンバータは, 1 周期の間に

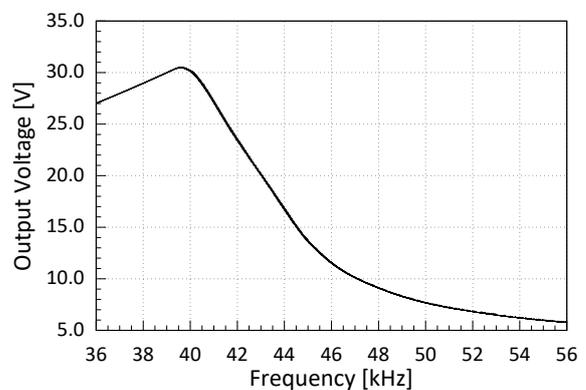


図2 スwitching周波数に対する出力電圧
 Fig. 2. Switching frequency vs output voltage ratio.

2回エネルギー伝達が行われることによりトランスの利用効率が上がり、小型化することが可能である。また、トランスが用いられていることから、降圧比を大きく設計することも可能である。降圧比を大きくすることで、一般的に昇圧コンバータで構成される PFC 電源から 1 段の電源で所望の出力電圧を得ることが可能となり、さらなる高効率化、小型化が可能となる。

3. EMI ノイズ低減

〈3・1〉 EMI ノイズ低減手法

従来の LLC 電流共振コンバータでは、 Q_1 および Q_2 を駆動するスイッチングパルスの周波数により出力電圧を制御していた。この場合、定常状態ではスイッチングパルスの周波数はほぼ一定の値となり、スイッチングノイズのパワーは特定の周波数に集中する。特定周波数にスイッチングノイズのパワーが集中することで、これらは電源ラインを伝導し、また電波として空中を伝搬して、他の機器への電磁妨害 (EMI) を発生させる。従来の EMI 低減手法には伝導ノイズ対策としてフィルタ、不要輻射ノイズ対策としてシールドケースが用いられてきた。しかし、これらの EMI 対策は回路サイズやコストが増大する問題がある。本提案ではスイッチング周波数を変調することによりノイズスペクトラムを拡散するスペクトラム拡散を用い EMI を低減する。本提案を用いることで、大型のフィルタや嚴重なシールドによらず、制御回路により EMI ノイズを低減するため、回路サイズやコストの問題を回避する。図 3 にスペクトラム拡散による EMI ノイズ低減回路を付加した LLC 電流共振コンバータを示す。LLC 電流共振コンバータにおけるスペクトラム拡散は、電圧制御に用いられる VCO の入力に数十 Hz の低周波信号を重畳し、スイッチング周波数を変調することにより実現する。

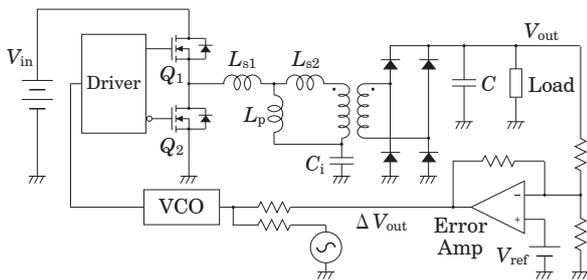


図 3 スペクトラム拡散を付加した LLC 電流共振コンバータ
Fig. 3. LLC resonant converter with frequency spread circuit.

〈3・2〉 EMI ノイズ低減シミュレーション結果

本提案回路を LTspice を用いシミュレーションを行った。表 1 にシミュレーション条件を示す。周波数変調信号は 0 ~ -1V, 20Hz として、VCO の変調感度は 10kHz/V と設定した。

表 1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation conditions

入力電圧	100V
出力電圧	12V
励磁インダクタンス L_p	198 μ H
漏れインダクタンス L_{s1}	22 μ H
共振用コンデンサ C_i	68nF
トランス巻数比	9.89 : 1
負荷抵抗	24 Ω

図 4 にノイズスペクトラム拡散前後のスイッチング周波数および出力電圧、図 5 にスイッチングノイズのシミュレーション結果をそれぞれ示す。

スイッチング周波数はスペクトラム拡散により約 120Hz 変化している。前述の通り変調信号の振幅は 1V であり、変

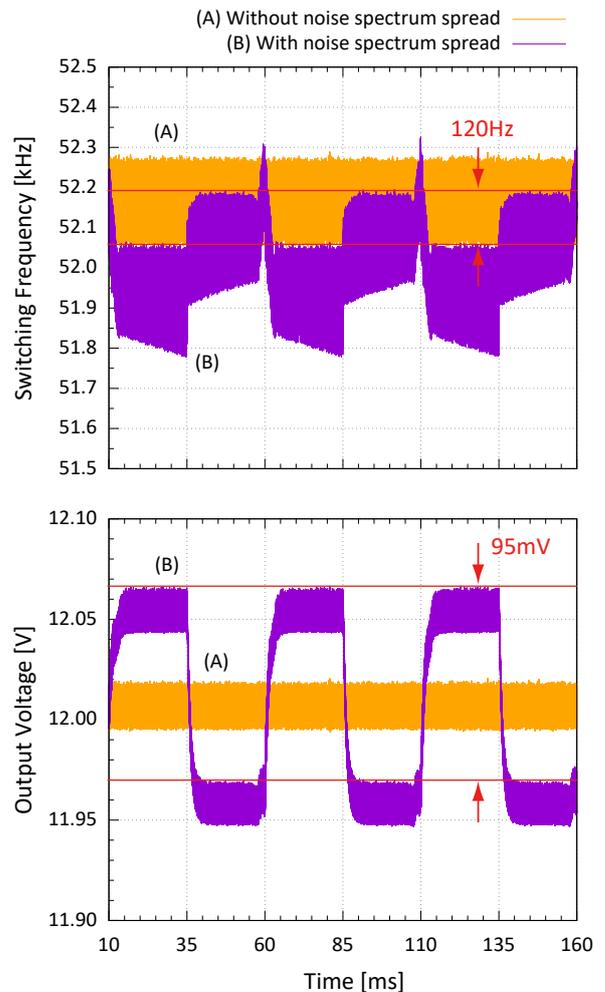


図 4 スペクトラム拡散前後のスイッチング周波数および出力電圧
Fig. 4. Switching frequency and output voltage before and after noise spectrum spread.

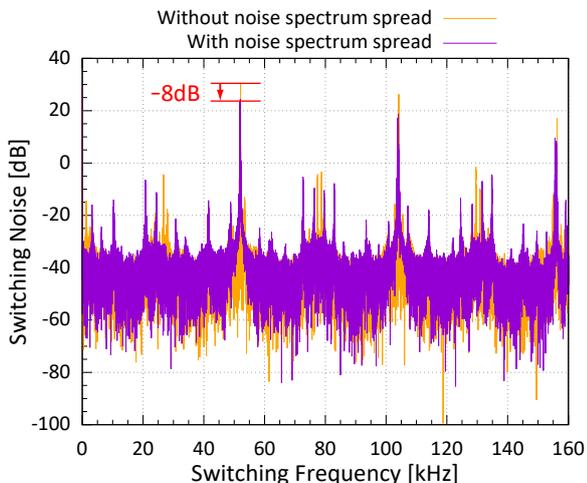


図5 スペクトラム拡散前後のスイッチングノイズ
Fig. 5. Switching noise before and after noise spectrum spread.

調感度は 10kHz/V としているため変調効果は 1.2%程度である。出力電圧はスペクトラム拡散により 95mV の変調リップルが生じている。スイッチングノイズのピーク値はスペクトラム拡散を施すことにより、8dB 程度低減しておりノイズ低減効果が得られることが確認された。

本提案回路によりノイズ低減効果が得られることが確認されたが、大きな変調リップルが発生し、変調の効果も限定的である。LLC 電流共振コンバータは周波数制御方式のスイッチングレギュレータであり、変調信号の大半はフィードバックにより除去される。スペクトラム拡散効果は残留した変調信号によるものと考えられ、これが変調リップルの主要原因であると推測される。

4. 変調リップル低減

〈4・1〉 変調リップル低減手法

LLC 電流共振コンバータは周波数制御方式のスイッチングレギュレータであり、スペクトラム拡散 VCO 入力を変調することにより大きな電圧リップルが発生する。また、フィードバックによりスペクトラム拡散の効果は限定的なものとなる。ここでは VCO 入力電圧を変化させることにより生じる出力電圧誤差を補正する方法を提案する。LLC 電流共振コンバータの制御回路において出力電圧を変化させるパラメータはスイッチングパルスの周波数の他に通常 50%固定値としているデューティ比がある。

図6にデューティ比に対する出力電圧を示す。出力電圧はデューティ比50%で線対称な特性となり、特にデューティ比0%~30%では、周波数によらず出力電圧はデューティ比の増加に従い上昇する。本提案回路では、周波数デューティ比特性から得た特性式をもとに VCO の入力電圧からデューティ比を算出することで電圧リップルを低減する。補正式は、LLC 電流共振コンバータを閉ループの状態としてデューティ比を変化させシミュレーションを行い、スイッチング周波数デューティ比特性を多項式近似

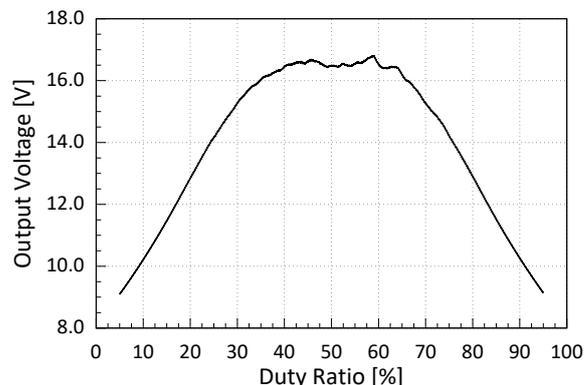


図6 デューティ比に対する出力電圧
Fig. 6. Duty ratio vs output voltage ratio

を行うことにより得る。

〈4・2〉 変調リップル低減シミュレーション結果

図7にスイッチングノイズのシミュレーション結果、図8にリップル低減前後のスイッチング周波数および出力電圧をそれぞれ示す。

パワーステージ部の素子値は〈3・2〉と同一である。変調信号は 1Vp-p、20Hz の三角波を用い、変調感度は 2kHz/V とした。デューティ特性式は、

$$0.355 \left(\frac{f}{1000} \right)^2 - 31.8487 \left(\frac{f}{1000} \right) + 722.5697 [\%] \dots (2)$$

である。

スイッチング周波数の変化は 470Hz であり、リップル低減手法を施すことで 3.9 倍に増加した。また、出力電圧リップルは 15mV であり、本提案手法により 84%低減した。リップル低減前の変調感度は 10kHz/V であり変調効率は 19.6 倍に増大している。

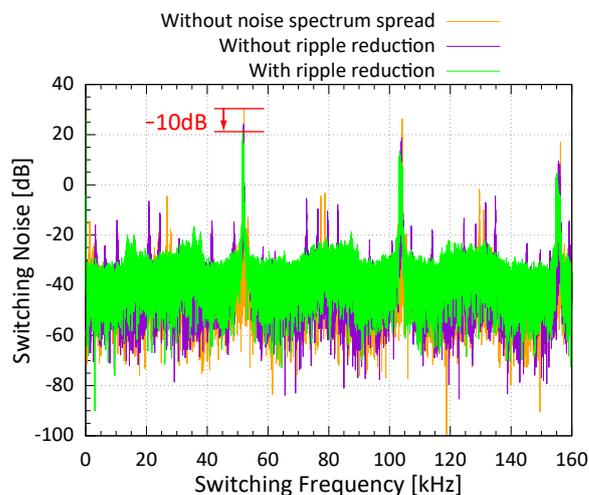


図7 スwitchングノイズ
Fig. 7. Switching noise

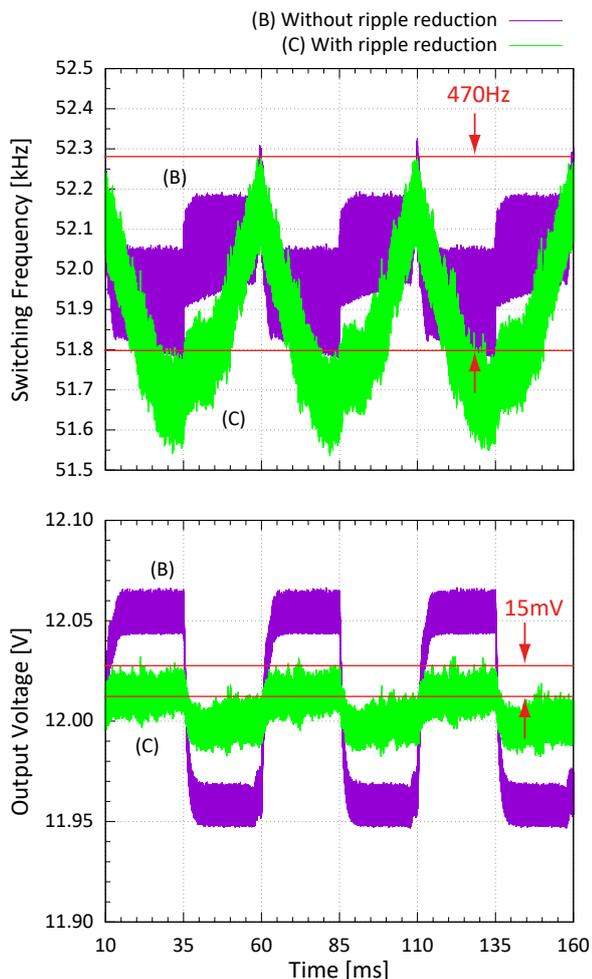


図8 リプル低減前後のスイッチング周波数および出力電圧
 Fig.8. Switching frequency and output voltage before and after ripple reduction.

リプル低減後のスイッチングノイズのピーク値はスペクトラム拡散前から 10dB 減少しておりノイズ低減効果を維持しつつ出力電圧リプルが抑制されることが確認された。

5. まとめ

本論文では、LLC 電流共振コンバータにスペクトラム拡散を施し、EMI ノイズ対策を行う手法を提案した。本提案では、VCO の入力に数十 Hz の低周波信号を重畳し、スイッチング周波数を変調することによりノイズスペクトラム拡散を行った。シミュレーションにより提案手法の効果を検証し、8dB 程度 EMI ノイズのピーク値が低減されることを確認した。

周波数制御電源の一種である LLC 電流共振コンバータは周波数変調により出力電圧リプルが増大するため、本論文では変調リプルの低減手法についても併せて提案した。変調リプルの低減は、通常固定とするデューティ比を変化させることで出力電圧が変動する点に着目し、周波数とと

もにデューティ比も変調させることにより実現した。変調リプルの低減についてもシミュレーションにより検証を行い、EMI ノイズ低減効果を維持しつつ出力電圧リプルを 85%低減することを確認した。

6. 課題

本論文では、シミュレーションにより得られた特性を元に検討を行ってきた。今後は、デューティ比出力電圧特性を中心にさらなる理論検討を行っていく。

文献

- (1) 落合 政司：「スイッチング電源の原理と設計」、オーム社、東京 (2015)。
- (2) K. Kawamura, T. Yamamoto and K. Hojo: “Circuit Technology of LLC Current Resonant Power Supply”, *Fuji Electronic Journal*, Vol.87 No.4, pp.268-272 (2014) (in Japanese).
 川村 一裕・山本 毅・北條 公太：「LLC 電流共振電源の回路技術」、*富士電機技報*, Vol.87 No.4, pp.268-272 (2014)。