

昇圧型 PFC 電源における EMI ノイズ低減の研究

大岩 紀行* 櫻井 翔太郎 築地 伸和 小堀 康功 小林 春夫 (群馬大学)

A Study on EMI Noise Reduction in Boost-Type PFC Circuit

Noriyuki Oiwa*, Shotaro Sakurai, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード: PFC 回路, EMI 低減, AC-DC 変換回路

(Power Factor Correction, Electro Magnetic Interference Reduction, AC-DC Converter)

1. はじめに

家庭や工場にて電力供給する商用電源は、高い送電効率のため交流で送電される。一方家電製品の内部回路においてはほとんどが直流電圧にて稼動する。このため仲立ちを行う AC-DC 電源回路の存在は不可欠になる。

低消費電力の家庭用機器で広く使用されている AC-DC 電源方式として、ダイオードブリッジに大型の平滑コンデンサを直接接続した「コンデンサ・インプット型」と呼ばれるスイッチング電源がある。簡単な構成でほぼ直流電圧に変換できるので多用されるが、入力電流波形が大きくひずんで力率が非常に低く、多くの高調波電流が発生して問題である。大電力機器に関しては国際規格などが設けられ、今後ますます厳しくなると思われる。

この力率の改善方法の 1 つに力率改善 PFC (Power Factor Correction) 電源がある。入力電圧波形は正弦波であるので、電流波形も同じ波形かつ位相のずれも無くなるよう制御する電源である。この動作により前述の高調波成分を大幅に低減することが出来る。

またスイッチング電源では大電力使用時や高速スイッチング時に電磁妨害(EMI: Electro Magnetic Interference)が問題視される。スイッチングノイズが大きく現れ、他の電気機器の誤動作を引き起こしてしまう。PFC 電源でも力率改善とともに、EMI ノイズの低減も大きな課題である。

本稿ではこの問題の解決策として、従来 PFC 電源において、クロック信号に周波数変調を施してクロック信号に伴う EMI ノイズをスペクトラム拡散するとともに、回路内のダイオードにより発生する大きなリカバリー電流を抑える方式を検討した。回路動作のシミュレーションには、電源回路シミュレータ SIMPLIS を用いて検証した。

2. 従来力率改善電源

〈2.1〉昇圧型 PFC 電源

昇圧型 PFC 電源の基本構成を図 1 に示す。正弦波入力を

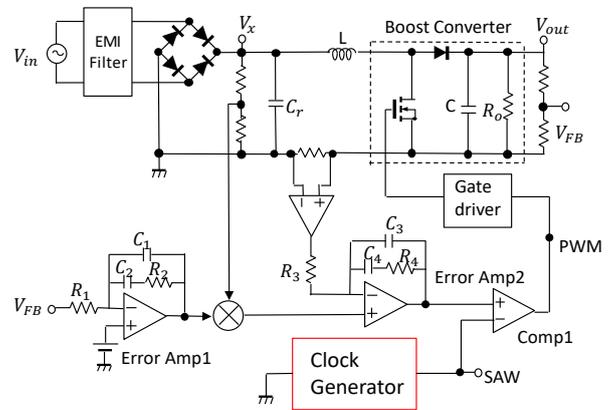


図 1 昇圧型 PFC 回路図

Fig. 1. Boost-type PFC circuit.

ダイオードブリッジで整流する。整流された電圧 V_x は NMOS のスイッチオフ時にはダイオードを伝わり、出力抵抗 R_o とコンデンサ C に伝播する。コンデンサ C には電荷が貯まるため電圧が維持される。次にスイッチオン時にインダクタからスイッチに向かって流れる。この時電流に伴った磁気エネルギーがインダクタに蓄積されるため、スイッチオフ時に蓄積したエネルギーを出力側に供給できる。これが一般に昇圧回路とされる動作である。なお入出力の増幅比はスイッチングのオン時間 T_{on} ・ オフ時間 T_{off} の比で決定され、次式(1)で表される。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} > 1 \quad (1)$$

出力電圧 V_{out} の分圧電圧 V_{FB} は基準電圧 V_{ref} と比較増幅され、さらに整流正弦波 V_x と掛け算される。この掛け算器の出力は V_x と相似波形であり、さらにインダクタ電流 I_L と比較される。この後、通常のスイッチング電源と同様に鋸歯状波 SAW と比較される。こうして生成された PWM(Pulse Width Modulation)信号がゲートドライバを介してスイッ

チング信号となる。

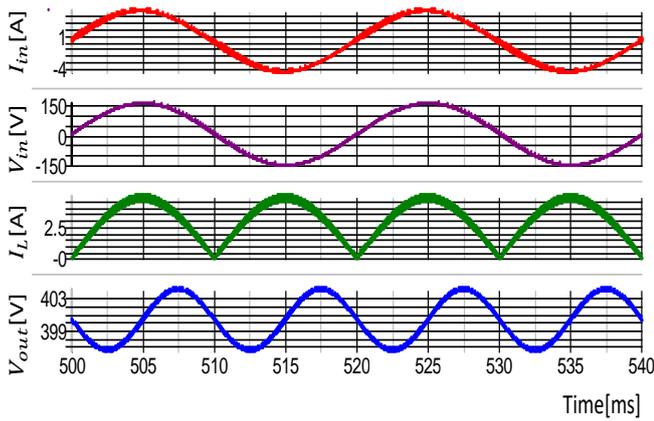


図 2 各動作波形(周波数変調なし)

Fig. 2. Waveforms without frequency modulation.

本来入力電流 I_{in} は入力電圧 V_{in} と同形状になることが好ましく、抵抗性負荷時には成立する。しかしモータ駆動時やコンデンサ入力型では電流の位相ずれや波形の歪みにより力率は大きく低下する。力率の低下はエネルギーの損失を生じさせる。なお力率は次の式(2)で定義される。

$$(\text{力率の定義}) = \frac{\text{実効電力}}{\text{皮相電力}} = \frac{\int (\dot{V} * i) dt}{\dot{V} * \bar{I}} \quad (2)$$

PFC 電源ではそれらを解消し、図 2 に示すように同位相の正弦波に近づける。

他の動作波形も図 2 に示す。整流ダイオードブリッジを経た電流波形は整流波形となって伝播する。入力電流も PFC 電源の働きで、入力電圧に追随するように波形ができたため同位相の波形をなす。

出力電圧 V_o には、一般に大きなリップルが残る。同図でも出力電圧の 1% の 4V 発生している。一般に PFC 電源は直接モータ駆動に用いられるか、次段に DC-DC 電源を接続するので、PFC 出力に多少リップルがあっても問題はない。

(2.2) 従来 PFC 電源の課題

現在 PFC 電源において、一般に 2 つの大きな課題が存在する。

(1) リカバリ電流に関して

1 つはクロック周波数を簡単に上げられない問題である。クロック信号の高周波化は動作速度を速め、電源回路の応答特性の精度を向上させる。さらにインダクタやコイルを小型化でき、回路規模が縮小される。一方でダイオードに生じるリカバリ電流が大きくなる。これは図 3 のように PN 接合ダイオード内部から生じるものである。順方向から逆方向での電流スイッチング時に、内部キャリアの中には伝導しきれないものが存在する。伝導しきれなかったキャリアが電位にしたがって元に戻ろうとするため、電流が一方にしか流れないはずのダイオードに逆電流が瞬間的に生じる。高周波で動作するときリカバリ電流の発生頻度が増加するため、大きな損失を被ることになる。

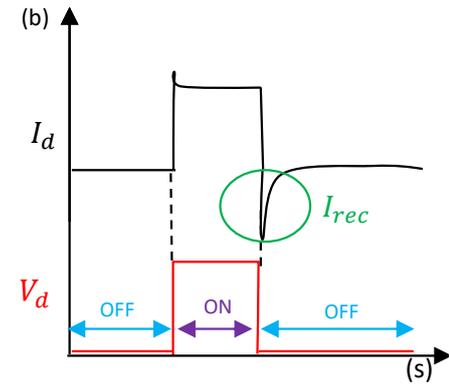
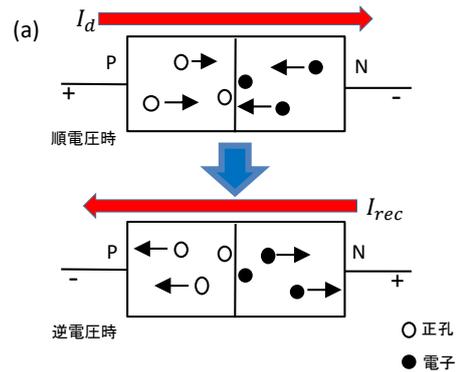


図 3 リカバリ電流特性

(a)リカバリ電流模式図、(b)電流波形

Fig. 3 Characteristic of recovery current;

(a)Explanation of recovery current, (b)Current Wave.

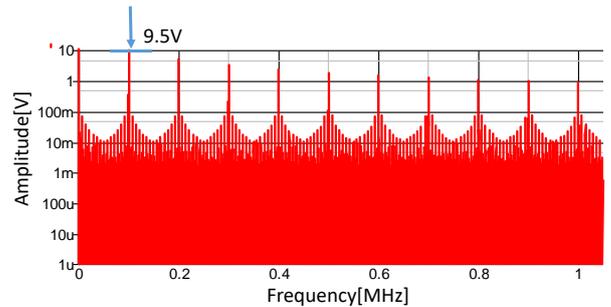


図 4 固定周期での PWM 信号のスペクトラム

Fig. 4. Spectrum of PWM signal in constant period clock.

(2) EMI 低減に関して

広く用いられている家庭用機器では、固定のクロック周波数を有したものも多く存在する。このため、他の電源回路でも疎かに出来ない問題である。

図 4 は PWM 信号のスペクトラムを示したものである。クロック周波数 100 kHz に大きなノイズレベルが発生している。またこの他に多くの高調波も存在する。回路動作から発生する電磁波や入力ラインへの伝導ノイズが他の動作に影響する元となる。

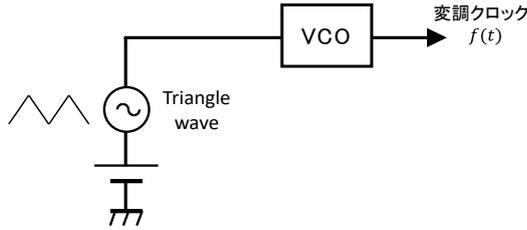


図 5(a) クロック変調発生器

Fig. 5(a). Spread spectrum clock generator.

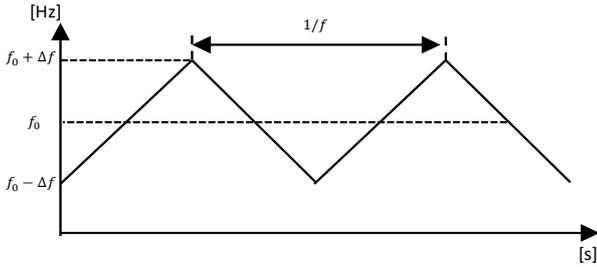


図 5(b) クロック変調の動作波形

Fig. 5(b). Waveform of clock modulation.

3. 提案 PFC 電源の EMI 低減方法

(3-1) クロック変調 PWM 制御方式

通常の昇圧型 AC-DC 電源では、EMI 低減の効果的手法としてクロック信号の周波数変調、あるいは位相変調を用いる。本稿では周波数変調を昇圧型 PFC 電源に適用する。

図 1 のクロック信号発生器に、図 5(a)の周波数変調回路を導入する。本稿で行ったリニア変調は電圧制御発振器 VCO(Voltage Controlled Oscillator)を用いた周波数変調を行った。入力された電圧の大きさに対応した周波数変調 Δf を与える。周波数変調は瞬時周波数 f をクロック周波数 f_0 と変調周波数 Δf の和を用いた式(3)で表される。

$$f = f_0 + \Delta f \quad (3)$$

VCO へ入力された電圧は式(4)のような周波数変換に利用され、線形的な時間変調を行う。

$$f(t) = k|V_{DC} + V_m(t)| \quad (\because k = 100\text{kHz/V}) \quad (4)$$

本稿での三角波信号を用いた概略図を図 5(b)に示す。三角波による変調は f_0 を中心として、前後の周波数に増減を繰り返す。この周波数変調の関係で、クロック信号の周波数に変化をもたらす。

(3-2) シミュレーション結果

周波数変調を行った PWM 制御の各動作波形は図 6 となる。変調周波数は $f = 100\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ に設定した。周波数変調の影響が出力電圧に現れるが、揺らぎは誤差 1% のまま変化はなかった。その他の動作波形にも大きな変化は観測されなかった。

この際の PWM 信号のスペクトラムは図 7(a)となる。クロック周波数(100 kHz)のスペクトラムレベルは無変調時で

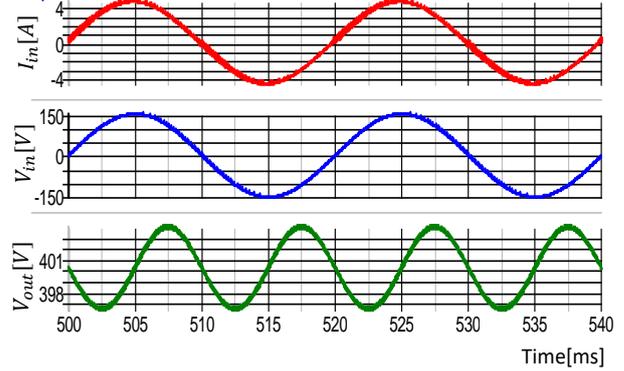


図 6 各動作波形 (周波数変調 1 kHz)

Fig. 6. Waveform with frequency modulation.

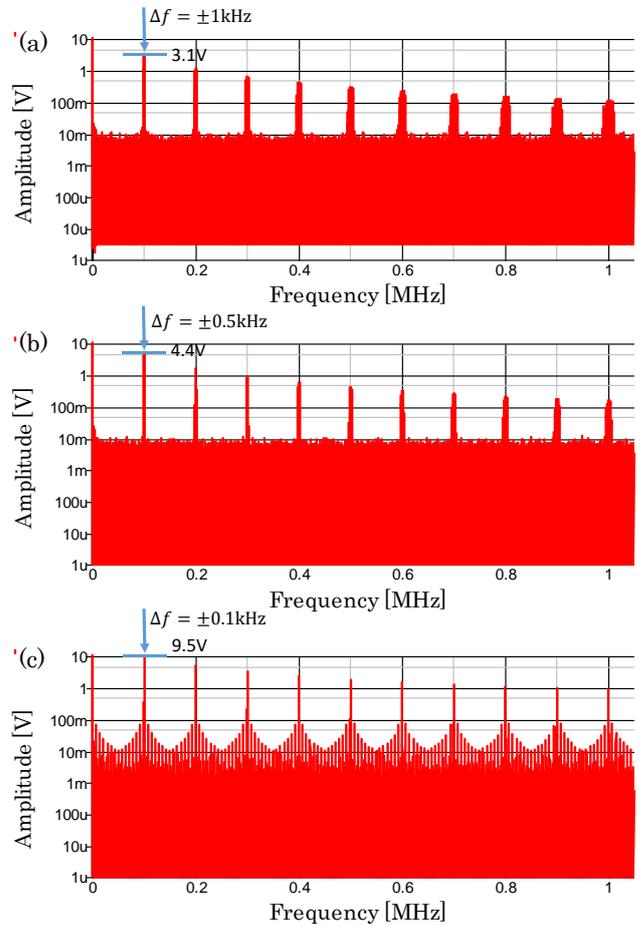


図 7 周波数変調時の PMM スペクトラム

(a) $\Delta f = \pm 1\text{kHz}$, (b) $\Delta f = \pm 0.5\text{kHz}$, (c) $\Delta f = \pm 0.1\text{kHz}$.

Fig. 7. Spectrum of PWM signal in frequency modulation;

(a) $\Delta f = \pm 1\text{kHz}$, (b) $\Delta f = \pm 0.5\text{kHz}$, (c) $\Delta f = \pm 0.1\text{kHz}$.

9.5 V、変調周波数 1 kHz を加えた時は 3.1 V と -9.7 dB 低減している。他の高調波についても低減されることが確認できる。これより昇圧型 PFC においても、クロック変調を用いる有用性を示すことができた。

更に変調周波数を $\Delta f = \pm 0.5\text{kHz}$, $\pm 0.1\text{kHz}$ と変更した際のスペクトラムを図 7(b), (c)に示す。変調周波数の変化に

表 1 提案回路のパラメータ値

Table1. Parameters in proposal circuit.

Parameter	Simulation Value
Vin	AC150 V@50 Hz
Vo	400 V
Io	768 mA
L	2.2 mH
C	330 μ F
f_{clk}	100 kHz

よって高調波は変化している。変調周波数を 0.1 kHz から 0.5 kHz に変更した際には-6 dB 減少, 0.5 kHz から 1.0 kHz に変更した際には-2 dB 減少している。これは変調周波数を高めると、高調波として出ているエネルギーが拡散しているためと考えられる。

周波数変調を増加した際の各動作波形を確認した。出力リップルが出るなどの影響が懸念されたが、大きな影響が出なかった。しかし入力電流やコイル電流にはやや歪みが見られた。高調波低減を行いつつ、正常な動作を実行できると示された。

4. リカバリー電流低減検証

(4.1) リカバリー電流低減シミュレーション

リカバリー電流防止策として使用ダイオードの変更が挙げられる。高速動作に適したダイオードの一種でショットキーバリアダイオード(SBD: Schottky Barrier Diode)がある。ショットキー障壁を利用したダイオードであり、過渡応答時間が短くリカバリー電流による損失低減に適している。しかし今までは耐圧が 200 V 程であり、400 V 近い高電圧を出力する PFC 電源には不向きであった。

近年これの改善案として、シリコンカーバイド(SiC)を SBD に用いている。SiC はシリコン(Si)と炭素(C)の化合物半導体である。Si 単体より絶縁破壊電界強度やバンドギャップが数倍あり、高耐圧かつ低オン抵抗であることから高周波使用に適する。SBD に利用することで、耐圧を 600 V 程まで高められる。

本稿では従来の PN ダイオードと SiC-SBD 利用時のリカバリー電流のシミュレーション結果を図 10 に示す。スイッチング周波数は 500 kHz と高めた。PN ダイオード使用時の図 10(a)では、リカバリー電流のピーク値が-40 A であった。SiC-SBD 使用時の図 10(b)は、約半分、-16 A と大きな改善が見られた。

ダイオードの消費電力から損失結果もシミュレーションした。損失でも SiC-SBD を使用したほうが、損失のピーク値が 280 W から 106 W と 62%カットされ半分以下になった。高速スイッチングになるほどリカバリー電流の発生頻度は増加するため、大きな損失低減が見込まれる。

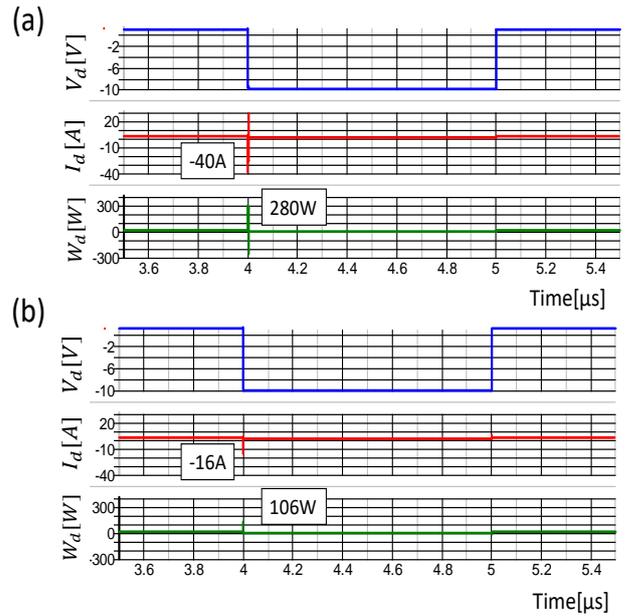


図 8 ダイオードへかかる電圧電流波形

(a)PN 接合ダイオード (b)ショットキー接合ダイオード

Fig. 8. Waveform of voltage and current in diode;

(a) PN Junction Diode, (b) SiC-SBD.

5. まとめ

昇圧型 PFC 電源において、クロックの周波数変調による PWM 制御の各動作比較および PWM 信号の EMI ノイズの低減をシミュレーションで確認した。その結果変調周波数 1 kHz では、無変調時と比較してスペクトラムレベルに 9.7 dB の低減が見込めた。また変調周波数を低くすると低減量が減少した。

一方、リカバリー電流の低減検討において、PN ダイオードでは 40 A 生じていたが、SiC-SBD では 16 A に低減した。このことから SiC-SBD の使用は、高速動作に有効な素子であることをシミュレーションで確認した。

文 献

- [1] Y. Kobori, L. Xing, G. Hong, T. Shishime, M. Ohshima, H. Kobayashi, N. Takai, K. Niitsu, "Novel AC-DC Direct Converter Design with PFC", International Conference on Power Electronics and Power Engineering, Phuket, Thailand (Dec. 2011).
- [2] 村上和貴 小堀康功 ケイ林 高虹 小野澤昌徳 小林春夫 高井伸和 新津葵一 「PFC 回路と AC-DC 変換器」 電気学会 群馬栃木合同研究発表会 ETG-11-12 群馬 2012.2.29
- [3] 浅石恒洋 小堀康功 白石尚也 須永祥希 築地伸和 高井伸和 小林春夫 「疑似アナログ信号を用いたヒステリシス制御方式降圧型 DC-DC コンバータの EMI 低減の検討」 電気学会 群馬栃木合同研究発表会 ETG-16-29 群馬 2016.3
- [4] H. Kobayashi, T. Nabeshima (Editors), *Handbook of Power Management Circuits*, Pan Stanford Publisher (2016)