

高速負荷変動に起因する絶縁型コンバータの磁気飽和現象*

小 浜 輝 彦**
向 野 佑 亮***
島 森 浩****

Magnetic Saturation due to Fast Dynamic Response of Isolated DC-DC Converter

Teruhiko KOHAMA, Yusuke MUKUNO and Hiroshi SIMAMORI

Magnetic saturation in low-voltage and high-current DC-DC converter with fast dynamic response is described. Core saturation presented here is observed in on-board isolated DC-DC converter due to inherent asymmetrical driving of conventional PWM IC under transient condition. The saturation is not eliminated by using capacitor for AC coupling of transformer. Mechanism of the saturation is analyzed and confirmed by experiments.

Key Words: Magnetic Saturation, Full-bridge converter, Point of Load

1. はじめに

現在、コンピュータシステムにおける電源として Point of Load (以下 POL) 方式が用いられている。POL とは負荷の直近に電源を配置する方式で例えば図 1 のように、200V AC から得た 48V DC を負荷の種類や状態に合わせて近くに設置した DC-DC コンバータで所要の電圧に変換し供給する。また、CPU や Memory 等に低電圧、大電流を必要とするため、電源モジュールを複数台用いた並列電源が採用されている。このためコンバータモジュールは小型化が要求され、設計余裕が厳しくなりつつある。図 2 のフルブリッジ型コンバータは小型化可能で大容量に適している。このことから、POL の電源モジュールに広く用いられる。

フルブリッジ型コンバータは S_1, S_4 と S_2, S_3 を交互にスイッチングすることでトランスに交流電圧を印加する構成となっている。一般に絶縁型コンバータではトランスの偏磁を防止するためコンデンサを使ってトランスの直流電流を抑えるが、コアの飽和磁束密度を超える急速

な磁束変化が発生した場合には、コンデンサでの応答が間に合わず磁気飽和現象を起こす。

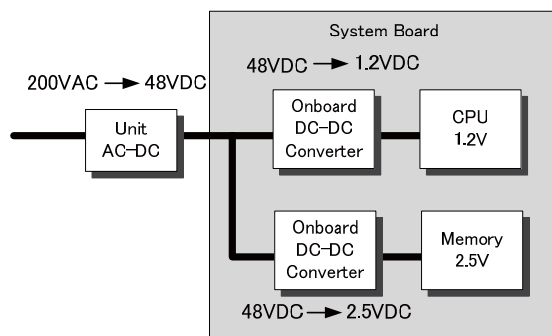


図1 Point of Load(POL)システム

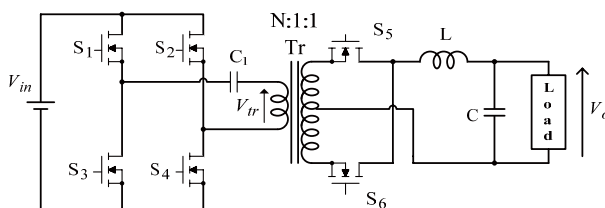


図2 フルブリッジコンバータ

* 平成20年12月19日受付

** 電気工学科

*** 工学研究科電気工学専攻

**** 富士通株

2. 磁束密度変化

フルブリッジ型コンバータの一般的な制御方式を図3に示す。

この制御方式は出力電圧と基準電圧の差を増幅した誤差電圧 V_{err} と三角波とをコンパレータで比較してPWM信号を作り、それをフリップ・フロップを用いて S_1, S_4 と S_2, S_3 に交互に振り分ける構成となっており、そのスイッチング信号は図4のように作られる。

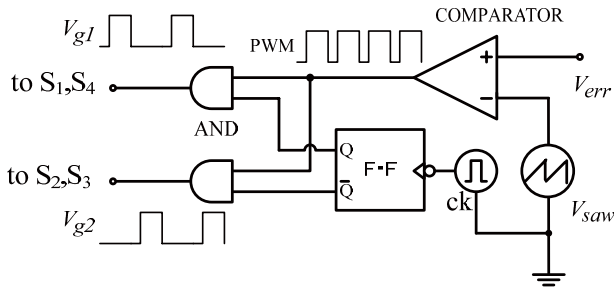


図3 一般的に用いられる制御回路

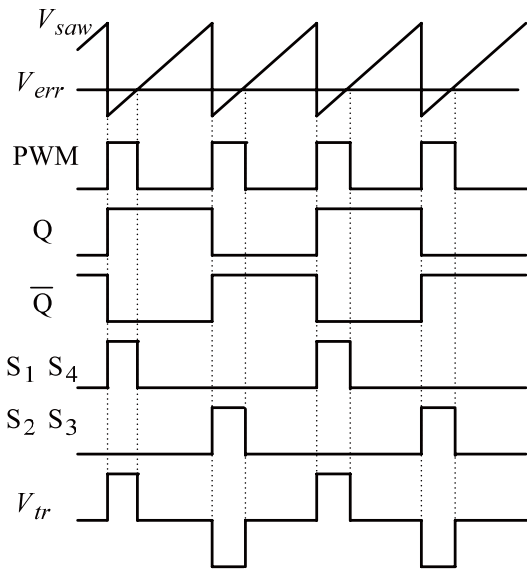


図4 定常状態におけるトランスの電圧波形

2.1 定常状態の磁束密度変化

定常状態におけるトランスの磁束密度変化を図5に示す。この図では時比率を最大値 D_{max} としている。この場合、飽和磁束密度 B_s と変化幅 ΔB_m の関係が $\Delta B_m < 2B_s$ を満たしていればトランスに磁気飽和現象は起こらない。

2.2 過渡応答時の磁束密度変化

高速負荷変動が起こった場合の過渡応答時には、図6のようにスイッチング信号が作られ、パルス幅変化が起こり、トランスの磁束密度変化に偏りが生じる。この偏りが飽和磁束密度 B_s を超えた場合、磁気飽和現象を引

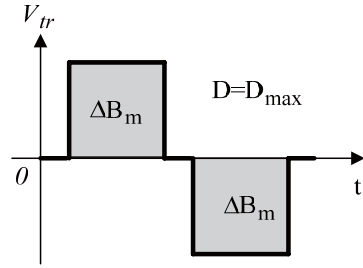


図5 最大時比率、定常状態におけるB-H特性

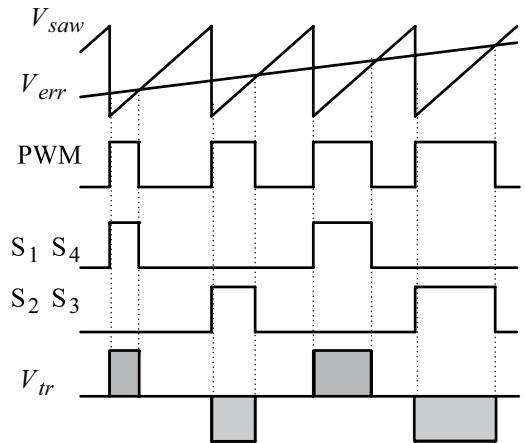
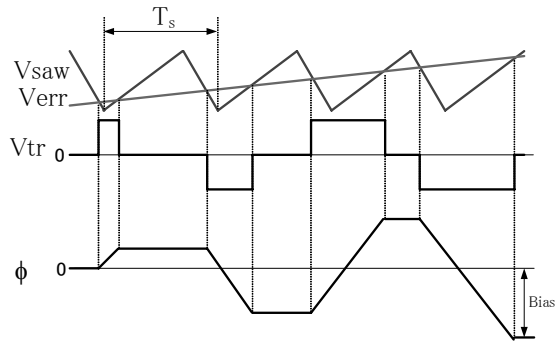


図6 過渡応答時のパルス変化によるトランス電圧波形

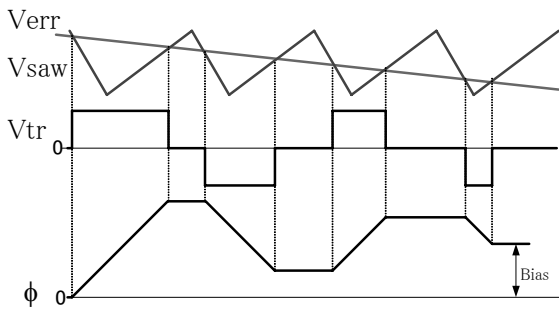
き起こすと考えられる。

図7にこのパルス幅変化による磁束の変化を示す。ここで図7(a)は軽負荷から重負荷に変動した場合、図7(b)は重負荷から軽負荷に変動した場合を示している。

この磁束の変化によるB-Hカーブ内での磁束密度変化は図8のようになり、動作の中心が上昇していることがわかる。 $\Delta B_m < 2B_s$ を満たしていても中心が偏ると、磁気飽和現象が起こる可能性がある。また、パルス変化

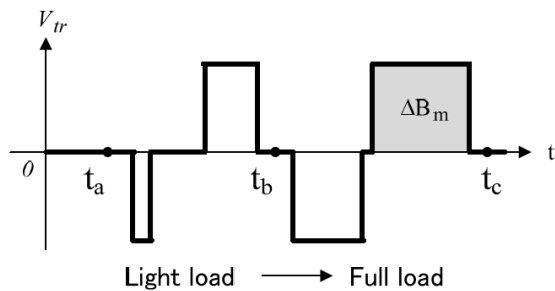


(a) 軽負荷から重負荷



(b) 重負荷から軽負荷

図7 パルス幅変化による磁束の変動



Light load → Full load

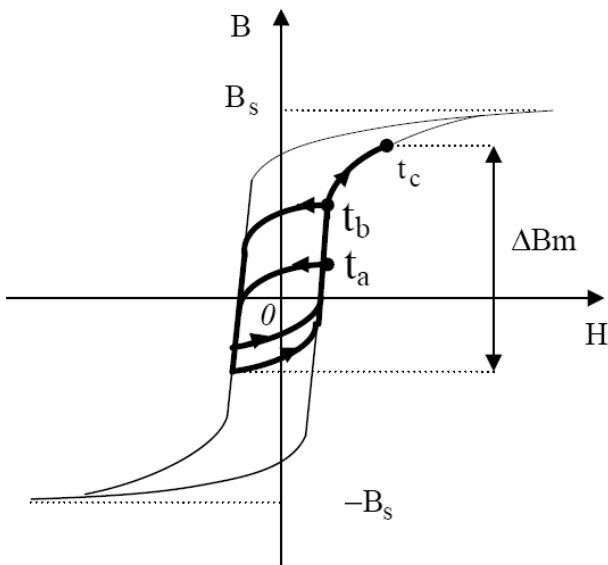


図8 負荷急変時の B-H 特性

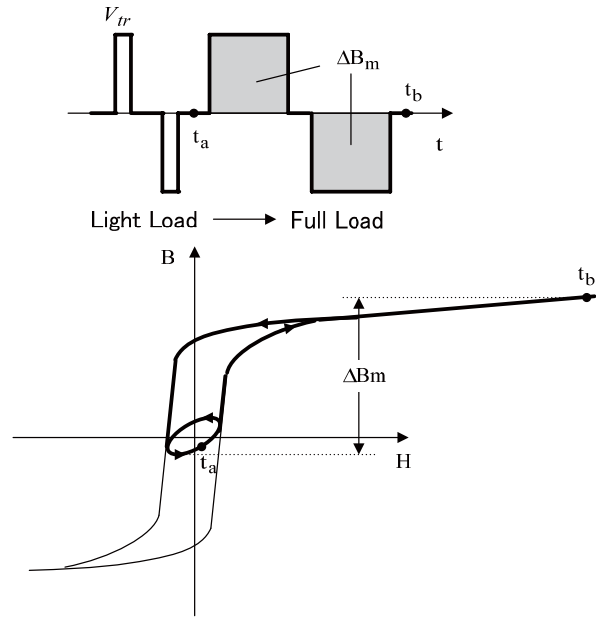


図9 超高速応答における負荷急変時の B-H 特性

がさらに急激に起こった場合、図9のようになり、ここでは完全に磁気飽和現象が起こっている。

3. 磁束密度変化速度の推定

負荷変動による単位時間当たりの磁束密度変化速度を推定する。

図10のように三角波 V_{saw} と誤差増幅電圧 V_{err} により、トランス電圧 V_{tr} が印加させる。ここでの磁束変化 $\Delta\Phi$ は、

$$\Delta\Phi = \frac{V_{in}(T_1 - T_2)}{n} \quad (1)$$

となる。但し、

V_{in} : 入力電圧

T_1 : 1つ目のパルスの ON 時間

T_2 : 2つ目のパルスの ON 時間

n : トランスの1次側巻数

である。

また、単位時間当たりの磁束密度変化量 ΔB_v は、コアの有効断面積を S 、スイッチング周期を T_s とすれば次式で与えられる。

$$\Delta B_v = \frac{\Delta\Phi}{S} \frac{1}{2T_s} \quad (2)$$

これにより、図11、図12、図13で示す V_{err} の変化速度 m に対する磁束密度の変化速度 ΔB_v の関係が得られる。実線は計算値、マーカーが実験値となっている。また、三角波の形状とスイッチング周波数はそれぞれ、

図11: $f_s = 600\text{kHz}$, 2等辺三角形の三角波

図12: $f_s = 600\text{kHz}$, のこぎり波

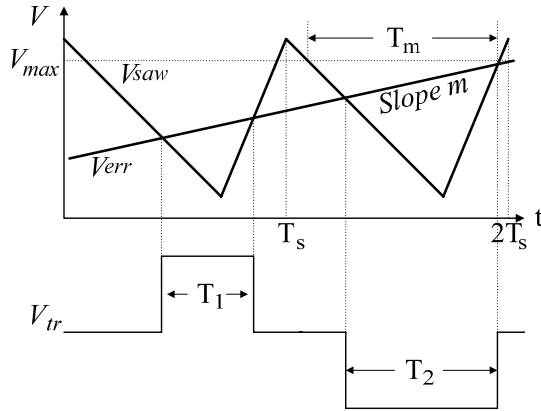


図10 磁束密度変化量の推定

図13 : $f_s = 1000\text{kHz}$, 2等辺三角形の三角波となっている. これから V_{err} の傾きが大きくなるにつれて磁束密度変化速度がおおきくなるのが分かる.

また, 図11と図13を比較するとスイッチング周波数が低い方が単位時間当たりの磁束密度変化量が大きい.

さらに, 図11と図12を比較すると, 磁束密度変化速度は, V_{err} の傾きがプラスの時, すなわち軽負荷から重負荷に変動する場合には, のこぎり波状の方が大きく, V_{err} の傾きがマイナスの時, すなわち重負荷から軽負荷に変動する場合には, 二等辺三角形形状の三角波が大きくなる. このことから磁束密度変化速度は三角波形状にも依存することが分かる.

以上のことから磁束密度変化速度は, 制御回路の応答速度, スwitching周波数, 三角波の形状に依存することが分かる.

飽和現象はこの磁束密度変化速度を積分した総変化量によって判断できる. 例えば, 軽負荷から重負荷に急変

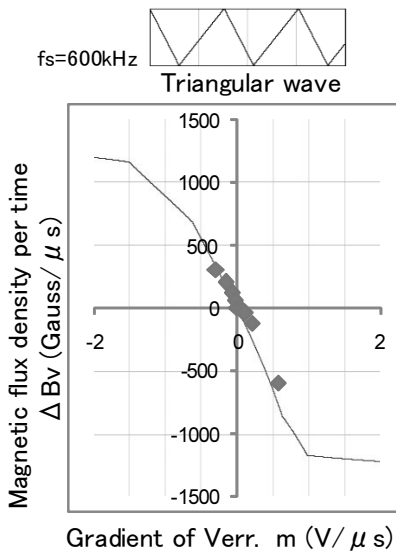


図11 単位時間当たりの磁束密度変化速度 ΔB_v と V_{err} の傾き m ($f_s = 600\text{kHz}$, 三角波: 二等辺三角形)

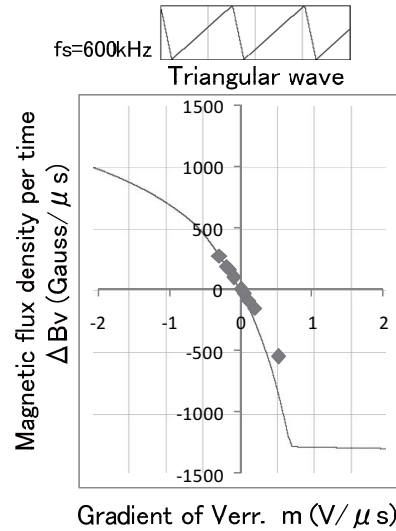


図12 単位時間当たりの磁束密度変化速度 ΔB_v と V_{err} の傾き m ($f_s = 600\text{kHz}$, 三角波: のこぎり波)

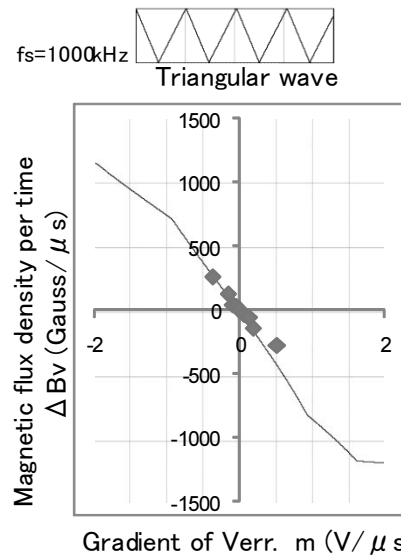


図13 単位時間当たりの磁束密度変化速度 ΔB_v と V_{err} の傾き m ($f_s = 1000\text{kHz}$, 三角波: 二等辺三角形)

した場合 V_{err} の変化速度を一定と仮定し変動中の時間を T_0 とすれば, 磁束密度総変化量 ΔB は

$$\Delta B = \Delta B_v \times T_0 \tag{3}$$

となる.

これが, 飽和磁束密度 B_s を超えると飽和が起こる.

4. 応答速度と磁気飽和現象

図14に負荷変動時の磁気飽和現象を実験で観測した波形を示す. コアに TDK EPC19PC44 ($B_s = 4500[\text{Gauss}]$ at60)を用いた.

図15に実験で使用した誤差増幅の周波数特性を示す. 遮断周波数は図14の(a), (b), (c)それぞれ 1.16×10^5 ,

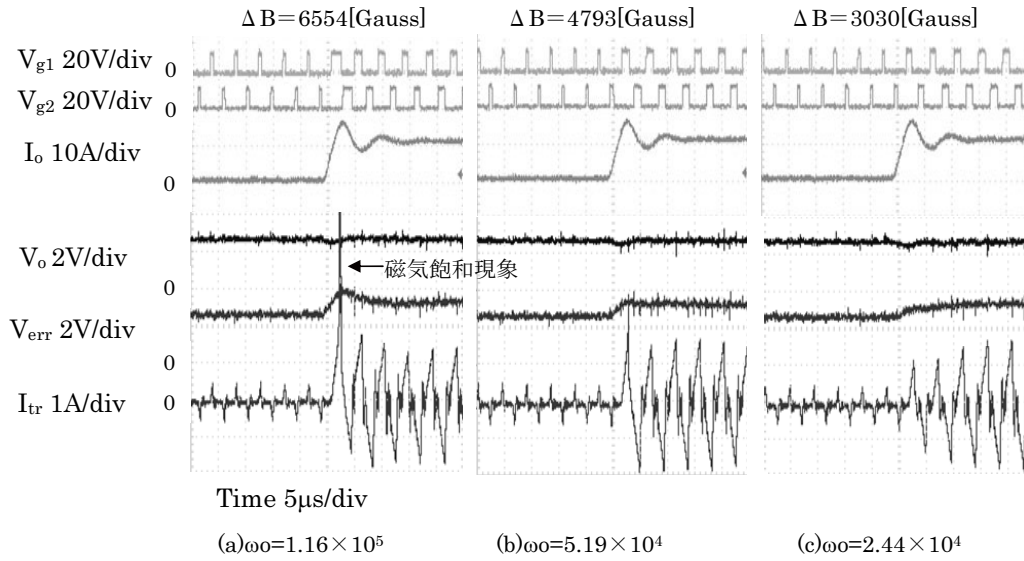


図14 高速負荷変動における磁気飽和現象

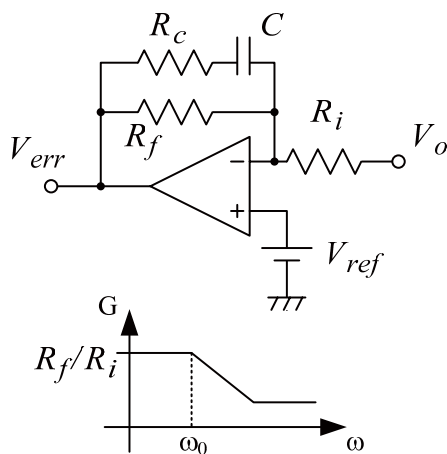


図15 制御回路の誤差増幅における遮断周波数 ω_o

5.19×10^4 , 2.44×10^5 [rad/s] となっており、負荷変動による磁束密度変化 ΔB は図14 (a) では6554Gauss、図14(b)では4793Gauss となっており共に B_s を超えるため飽和現象が観測される。一方、図14(c)では3030Gauss となるので飽和は起こらないことが分かる。

5. まとめ

高速負荷変動に起因する絶縁型コンバータの磁気飽和現象について原因の解明と解析を行った。この磁気飽和現象はPWM制御ICの応答速度によるパルス幅の偏りが要因であり、偏磁防止コンデンサでは対処できない。このとき生じる磁束変化量は制御ICの応答速度、スイッチング周波数および三角波形状に依存して変わることが明らかとなった。今回得られた情報を元に偏磁防止対策の実施が急務である。

参考文献

- [1] H.Shimamori, T.Kohama, S.Yamashita, K.Itakura, T.Ninomiya, "New Switching Control for Synchronous Rectifications in Low-Voltage Paralleled Converter System without Voltage and Current Fluctuations," IEEE 34th Power Electronics Specialists Conference Record, pp.150-155, 2003.
- [2] H.Shimamori, K.Itakura, S.Yamashita, T.Kohama, T.Ninomiya, "Abnormal Phenomenon of Output-Voltage Increase and Its Solution in a Parallel-Redundant DC-DC Converter System with Current Sharing Control," Proceedings of IEEE 27th International Telecommunications Energy Conference, 2005.
- [3] J.D. Greene, C.A. Gross, "Nonlinear Modeling of transformers," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.24, No.3, pp.434-438, 1988.
- [4] Z.Wang, Y.Liu, "Harmonic Analysis of Transformers under Converter Load with DC and Low Frequency Bias", Proceedings of the American Power Conference, Vol.59, pp449 ~ 454, 1997
- [5] X.Lin and P.Liu, "The Ultra-Saturation Phenomenon of Loaded Transformer Energization and Its Impacts on Differential Protection," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, pp.1265-1272, 2005.
- [6] D.C.Yu, J.C.Cummins, Z.Wang, H.Yoon, and L.A.Kojovic, "Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation

- Using Artificial Neural Networks,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, No.2, pp.189-194, 2001.
- [7] J.Pan, K.Vu, Y.Hu, “An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.4, pp.1623-1628, 2004.
- [8] J.H.Brunke, K.J.Frohlich, “Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching-Part I:Theoretical Considerations,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, No.2, pp.276-280, 2001.
- [9] Texas Instruments UC3825N data sheet, SLUS334C - AUGUST 1995 - REVISED AUGUST 2004.
- [10] TDK core datasheet, 001-03/20071011/j140_1
- [11] 小浜輝彦, 向野佑亮, 島森 浩 “高速負荷変動に起因する絶縁型コンバータの磁気飽和現象”平成20年度電気学会全国大会講演論文集 No.4-70
- [12] 小浜輝彦, 向野佑亮, 島森 浩 “高速負荷変動に伴う絶縁型コンバータの磁気飽和現象”平成20年度電気関係学会九州大会講演論文集 No.09-2P-09