

電流三角波モードを適用した DC/DC コンバータの インダクタ損失を考慮した損失比較

◎宮田 湧気, 渡辺 大貴, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

電気自動車などにおいて DC/DC コンバータの高パワー密度化が要求されている。電流連続モード(CCM)は設計が容易なため幅広く適用されている。一方、電流三角波モード(TCM)はインダクタを小さくでき、ゼロ電圧スイッチング(ZVS)可能なため高効率化が期待できる⁽¹⁾。一方、TCMはスイッチング周波数が負荷条件によって変動するため磁性体の損失が負荷条件に大きく依存する。

本論文では、各電流モードにおける DC/DC コンバータの損失について、負荷条件に着目して比較検討を行う。

2. 損失解析手法

図1に昇圧チョップパの回路図を示す。解析の見通しをよくするために、インダクタ電流平均値 I_{ave} を変数として回路損失を(1)式のように表現する。

$$P_{loss} = K_2 I_{ave}^2 + K_1 I_{ave} + K_0 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 K_2 , K_1 , K_0 は回路損失の発生要素で決まる定数である。(1)式において、回路損失は電流の二乗に比例する項(K_2 項)、電流に比例する項(K_1 項)、電流に比例しない一定項(K_0 項)として表現する。ここで K_2 項は導通損失、および銅損、 K_1 項はスイッチング損失、 K_0 項は無負荷損失を意味している。

3. 損失解析結果

図2にインダクタ電流平均値 I_{ave} を変化させた場合の CCM と TCM における各損失の計算値を示す。なお、電圧条件は一定とし、図2中では鉄損は考慮していない。TCMでは電流リップルを CCM に対して大きく設計するため、 K_2 項が CCM に対して増加する。一方で、TCMはZVS動作となるため、 K_1 項はゼロとなる。CCMではMOSFETの出力容量の充放電に伴い、無負荷損失項(K_0)が発生する。一方TCMではZVS動作となるため、出力容量に起因する無負荷損失が理論上、発生しない。

図3にインダクタ電流平均値 I_{ave} を変化させた場合における、CCM と TCM の鉄損を示す。今回は鉄損解析シミュレータ GeckoMAGNETICS を用いて評価した。図3より、CCM と比較して、TCM では電流平均値に応じて鉄損が大きく変化している。これは CCM ではスイッチング周波数が一定であるのに対し、TCM はスイッチング周波数が負荷に依存して変動する。重負荷ではスイッチング周波数が低くなるが、電圧時間積が大きくなるため磁束密度が増加し、鉄損が増加する。CCM ではスイッチング周波数は一定のため電圧時間積はほぼ変わらないが、直流磁界バイアスの影響により電流平均値に応じて鉄損が増加する⁽²⁾。

4. 効率の理論値と実験値の比較

図4に実験値での効率測定結果と解析値の比較を示す。図4より、本解析の条件では解析値、および実験値の両方でTCMが高効率となった。一方で、各動作モードにおける、解析値と実験値には誤差が発生している。この要因としては、使用した回路のゲート抵抗値がデータシートの値と異なることによるSW損失の誤差などが考えられる。またTCMでは特に重負荷で誤差が大きくなり、損失の理論値と実験値に約29%の誤差が生じている。今後は鉄損を含めた詳細な理論検討を実施する。

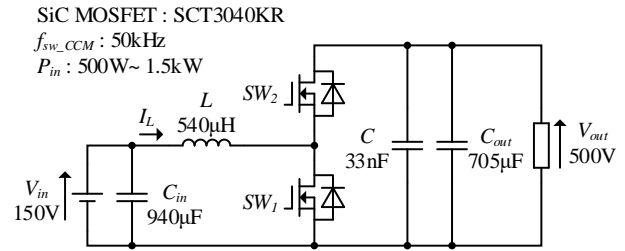


Fig. 1. Circuit configuration

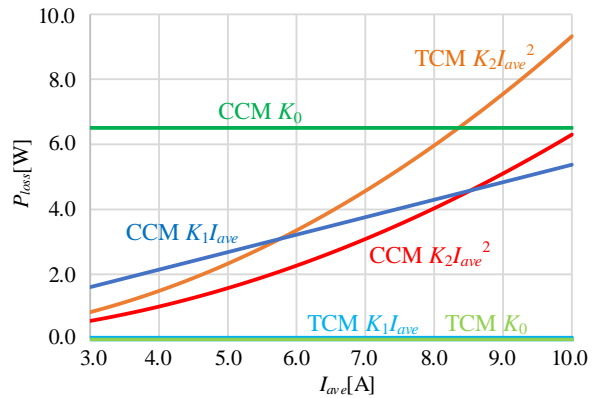


Fig. 2. Relationship between I_{ave} and losses under CCM and TCM

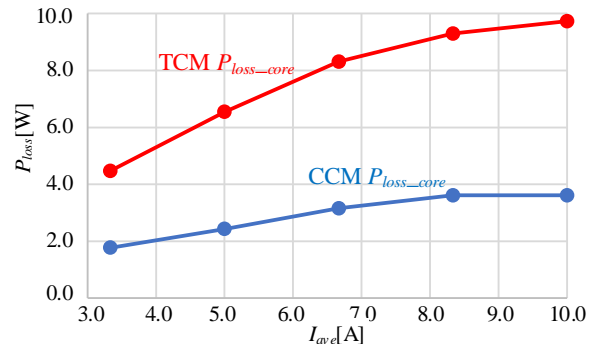


Fig. 3. Relationship between I_{ave} and core loss under CCM and TCM.

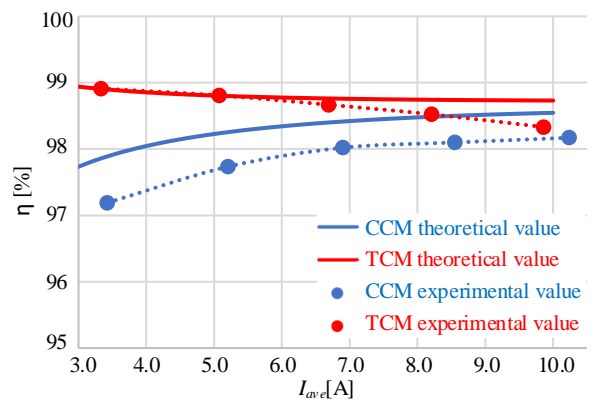


Fig. 4. Comparison of efficiency characteristics.

参考文献

1. Christoph Marxgut, et al, IEEE Trans. on PEL., Vol.29, No.2, pp.873-882 (2014)
2. 三輪 他, 電学論 D, Vol.137, No.5 pp.385-394 (2017)