

# 非最小位相系向けの新しいフィードフォワード制御理論とその応用に関する研究

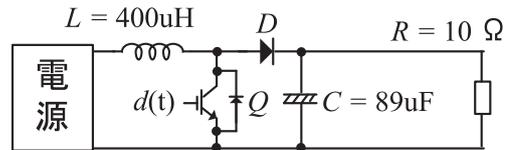
2019年7月より東京大学古関研究室助教の大西亘氏らと共同により、非最小位相系向けの新しいフィードフォワード制御理論とその応用に関する研究を進めている。非最小位相系とは、伝達関数で表現すると不安定零点や遅延のある系のことを言う。特に連続時間での伝達関数に不安定零点がある制御系で開ループ制御を行うとその出力に逆応答が生じるという問題が知られている。一方で、フィードフォワード制御とはセンサや推定器等によるフィードバック制御と異なり、その制御系のモデルを基に構築した制御器を指令信号に直列に挿入して用いることで制御系の出力応答の改善を図る手法である。あらかじめ制御系の伝達関数などの数学モデルが既知である場合大幅な目標値応答改善が可能であることが知られている。しかしながら上述したように伝達関数に連続時間における不安定零点を持つ制御系に対して、従来知られている手法でフィードフォワード制御を試みた場合、その不安定零点の影響により安定かつ有効なフィードフォワード制御器を構築することは困難であった。しかし2019年IEEE/ASMEにて大西亘氏らによって発表された論文では、非因果的\*なフィードフォワード制御器を用いることでこの問題を解決した。

当社の製品において主な非最小位相系の制御対象として例えばDC/DCコンバータがある。ここで、昇圧コンバータの電気回路を数式モデルで表現するとその回路に生じる電流や電圧等の状態によって、その伝達関数の分子や分母の変数にかかる係数が刻々と変化してしまうので、このままではこの非因果的フィードフォワード制御器を構築することができないといった問題があった。

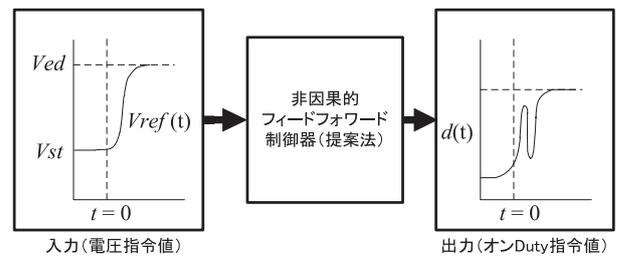
我々はこの問題に取り組み、昇圧コンバータの逆応答を改善する非因果的フィードフォワード制御器と、該昇圧コンバータの出力応答を改善する非因果的フィードフォワード制御器を二つ並列に用い、それら二つのフィードフォワード制御器の出力際の重み係数を適切に演算することにより、昇圧コンバータに例えばステップ的な急峻な出力電圧指令が入力された際において出力電圧応答をフィードフォワード制御のみで大幅に改善できることをシミュレーションにより確認した。この研究成果は2019年の電気学会半導体応用・モータドライブ合同研究会にて第一報が発表された。その後、小容量の昇圧コンバータ回路を自作し、実験によりその有効性を確認した。図1に実験で用いた昇圧コンバータ回路図を示す。図1のスイッチング素子Qのオンデューティ  $d(t)$  を提案する非因果的フィードフォワード制御器により求める。なお、負荷は純抵抗Rとし、出力電圧(Rの両端の電圧)のフィードバック制御は行わずに出力電圧応答を評価する。図2に提案する非因果的フィードフォワード

制御器の入出力を示したブロック図を示す。提案する制御器の入力の、出力電圧指令値  $V_{ref}(t)$  は初期値 ( $V_{st} = 10V$ ) から最終値 ( $V_{ed} = 15V$ ) まで2msの立ち上がり時間をかけて滑らかに変化するものとする。提案する制御器の出力のオンデューティ  $d(t)$  は  $V_{ref}(0) = V_{st}$  の値から変化する時刻 ( $t = 0$ ) よりも前の時点から所定の値になるように提案する制御器によって演算される。以上により昇圧コンバータは出力電圧指令値が急峻に変化した場合もアンダーシュートとオーバーシュートをできる限り抑制しつつ出力電圧指令値  $V_{ref}(t)$  に追従した応答をする。図3に実験によって得られた昇圧コンバータの出力電圧応答結果を示す。ここで、水色線は従来手法による出力応答であり、青色線は提案手法の応答結果である。これより、出力電圧応答時における提案法と従来法の差がわかる。提案法では出力電圧の応答結果が従来よりも改善されていることが確認できる。

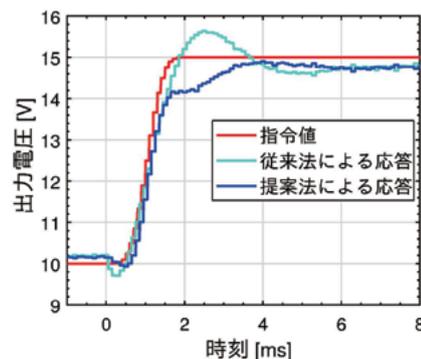
今後はさらなる研究を推し進めて、より実用的な電力変換器の応答改善と、産業界におけるその実用化を目指す。



■ 図1 昇圧コンバータ回路図



■ 図2 非因果的フィードフォワード制御器(提案法)



■ 図3 昇圧コンバータ出力電圧応答実験結果 (スイッチング周期ごとに平均した出力電圧値)

\* 未来の目標軌道を予見し、事前に制御入力を印加すること。