

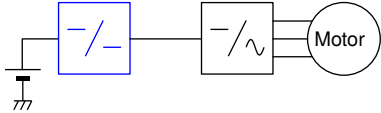
時変規範モデルと非因果的制御入力を用いた2自由度制御による昇圧コンバータの精密な出力電圧制御の研究

三好正太 (東京大学)

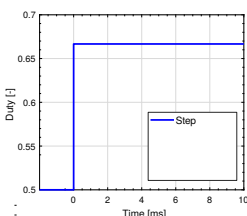
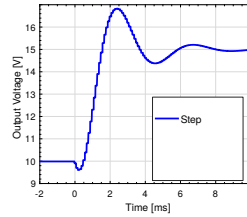
昇圧コンバータの制御の目的

昇圧コンバータを可変電圧駆動することで様々な可能性が生まれる
 ・パルス振幅変調 (PAM) 制御への応用
 ・EV, 電気鉄道などモータ駆動の制御による高効率化

可変電圧 昇圧コンバータ

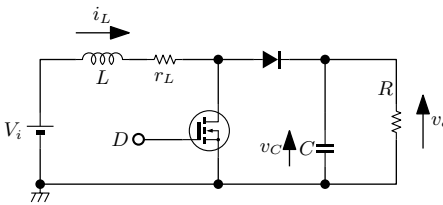


一方で、昇圧コンバータで高速可変電圧するためデューティ比を急変すると出力電圧にアンダーシュート, 大きなオーバーシュート
 制御によって抑えられる!



デューティ比の急変と出力電圧のアンダーシュート

昇圧コンバータのモデル化



変数	内容
D	デューティ比
v_o	出力電圧
i_L	コイル電流
V_i	入力電圧
R	負荷抵抗
L	インダクタンス
r_L	コイルの直列抵抗
C	静電容量

状態空間平均化法により求められる状態方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix} + B V_i, \quad \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix}$$

$D' = 1 - D$ (デューティ比により定まるパラメータ)

上記の状態空間は D' について非線形
 動作点周りの線形化で伝達関数を得る

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta D}(D') = \frac{V_i}{LC(D'^2 R + r_L)} \frac{-Ls + D'^2 R - r_L}{s^2 + \frac{Cr_L R + L}{LCR}s + \frac{D'^2 R + r_L}{LCR}}$$

小信号伝達関数は非最小位相系 → アンダーシュートの原因
 デューティ比が増加する時 L のエネルギーが増加するまでに時間がかかるが, その間に C のエネルギーを過剰に引き出して, 出力電圧が下がる

事前にエネルギーを多めにコイルにチャージしておけば, 出力電圧のアンダーシュートを減らせる

Preactuation (前もって動かす)

非因果的な負の時間から制御入力 (不安定零点の時定数で決まる)

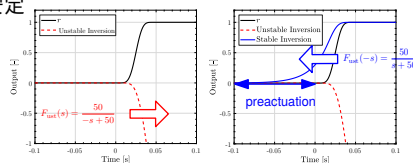
非最小位相系: 普通の逆系は不安定

⇒ s 平面で虚軸反転 ($s \rightarrow -s$)

⇒ 安定な逆系

⇒ 時間軸反転

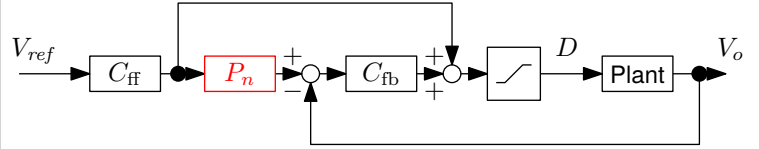
有界な制御入力



結論

- 昇圧コンバータを可変電圧出力で動かす場合には, 出力電圧過渡応答にアンダーシュートを生じる問題がある。アンダーシュートに対処するFF制御手法であるPreactuationに注目し, LPV系である昇圧コンバータへの応用を提案した。
- 規範モデルFBとPMFによる2自由度制御を構成することにより, 従来法に比べアンダーシュート, オーバーシュートの大幅な低減と整定時間の大幅な改善に成功した。実機実験は今後の課題である。
- 本手法により昇圧コンバータを用いた可変電圧駆動の高速高精度化が期待できる。更に, 副次的な効果として昇圧コンバータを構成するコイル, コンデンサ素子の耐圧, 容量などサイズ低減にも適用可能である。

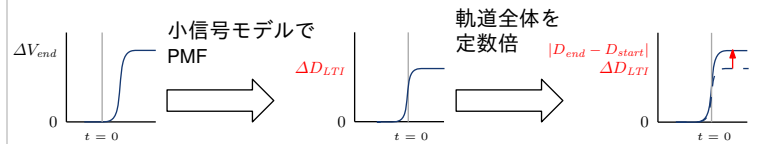
提案手法



FF制御としてPreactuated Multirate Feedforward (PMF)
 FB制御として規範モデルFB + PID制御
 を用いる2自由度制御

PMFの昇圧コンバータへの応用: 非線形性の考慮が必要

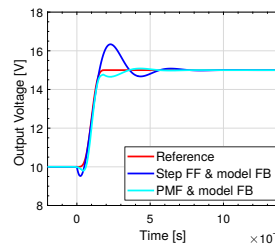
(1) 2動作点 D_{start}, D_{end} に対しPMFを適用 加えて, 非線形性による定常誤差補償のため軌道全体を定数倍



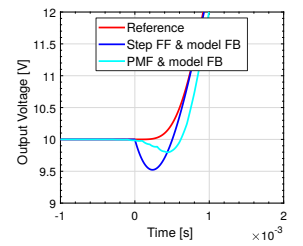
(2) 2つのDuty軌道それぞれの基準動作点 D_{start}, D_{end} からの近さによる内分

$$D(t) = \frac{D_1(t)(D_{end} - D_2(t)) + D_2(t)(D_1(t) - D_{start})}{(D_1(t) - D_{start}) + (D_{end} - D_2(t))}$$

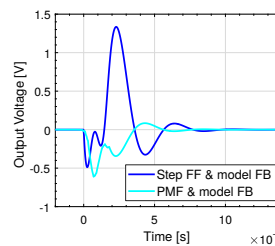
シミュレーションと実機実験



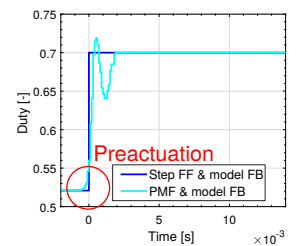
出力電圧



出力電圧 (拡大)



電圧目標値に対する誤差



デューティ比

FF制御+規範モデルFBのシミュレーションによる性能比較
 PMFを応用した提案法により

・オーバーシュート

Step FF 27.1 % → PMF 2.1 %

・アンダーシュート

Step FF 10.0 % → PMF 3.6 %

・整定時間

Step FF 5.28 ms → PMF 3.22 ms