無断転用不可
主催：特定非営利活動法人YUVEC
後援：YNU 国立大学法人 横浜国立大学
協力：よこはま高度実装技術コンソーシアム(YJC)

⑥【DC-DC 変換器】　講師：譲原逸男

DC-DC変換器 （第3日2限）

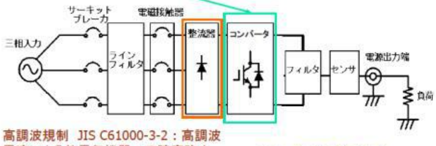
横浜国立大学
譲原　逸男

目次

1. DC-DC変換器の概要
2. LCの働き
(2-1)~(2-5)　RLとRC回路。インダクタおよびキャパシタのふるまい。
3. チョッパ回路
(3-1)　スイッチ素子に要求される条件
(3-2)~(3-5)　降圧チョッパ
(3-6)~(3-7)　昇圧チョッパ
(3-8)~(3-9)　昇降圧チョッパ
(3-10)　各種チョッパのキャパシタ電流の比較
4. DC-DCコンバータ
(4-1)　降圧チョッパの絶縁化の検討
(4-2)~(4-4)　フォワードコンバータ
(4-5)　フライバックコンバータ
(4-6)　プッシュプルコンバータ
5. DC-DCコンバータの応用例
(5-1)　位相シフト方式DC-DCコンバータの原理
(5-2)　700kHz位相シフト方式DC-DCコンバータ
(5-3)　4合成位相シフト方式DC-DCコンバータ

1. DC-DC変換器の概要

直流電圧を出力する方式は、商用交流電圧を受電し、整流器で一旦直流に変換（AC-DC変換）後にコンバータ動作（DC-DC変換）させるのが一般的である。

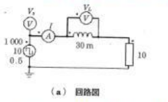


高調波規制　JIS C61000-3-2：高調波電流による他電気機器への障害防止

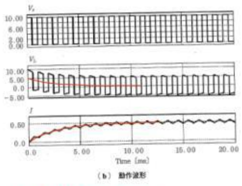
図1　回路構成図

2. LCの働き
(2-1) RL回路の応答

DC-DC変換の平滑用にLが用いられる例



（a）回路図



（b）動作波形

R=10Ω、L=30mH。時定数τは
τ=L/R=30mH/10Ω=3ms

98%応答は　t=4τ=12ms

$$1-e^{-\frac{1}{\tau}t}=1-e^{-\frac{1}{\tau}4\tau}=1-e^{-4}=0.98$$

図2.1　方形波電圧に対するRL回路の応答

2. LCの働き
(2-2) RL回路のステップ応答

RL回路の過渡応答

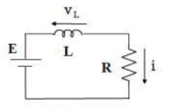


図2.2　RL回路

$$E=v_L+Ri=L\frac{di}{dt}+Ri$$

$$E/s=Lsi(s)-Li(0)+Ri(s)$$

$$i(s)=\frac{E/s+Li(0)}{L(s+R/L)}$$

$$=\frac{E}{R}\left(\frac{1}{s}-\frac{1}{s+R/L}\right)+\frac{i(0)}{s+R/L}$$

$$i(t)=\frac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)+i(0)e^{-\frac{R}{L}t}\quad\cdots\cdots(2.1)$$

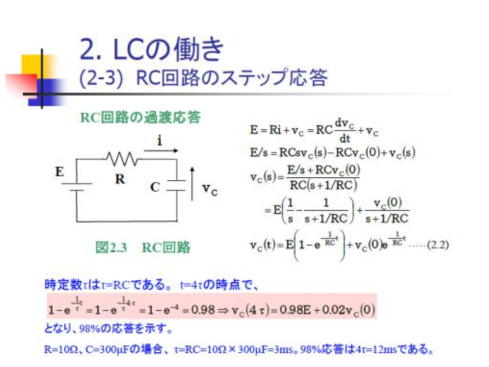
時定数τはτ=L/Rである。 t=4τの時点で、

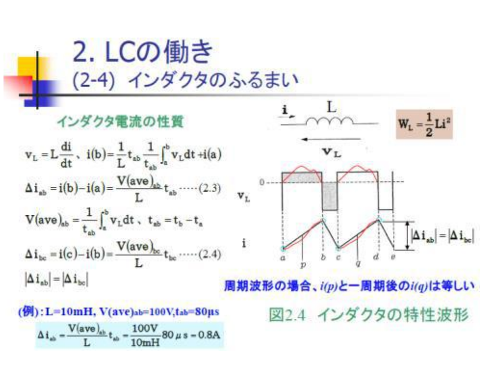
$$1-e^{-\frac{1}{\tau}t}=1-e^{-\frac{1}{\tau}4\tau}=1-e^{-4}=0.98\Rightarrow i(4\tau)=0.98\frac{E}{R}+0.02i(0)$$

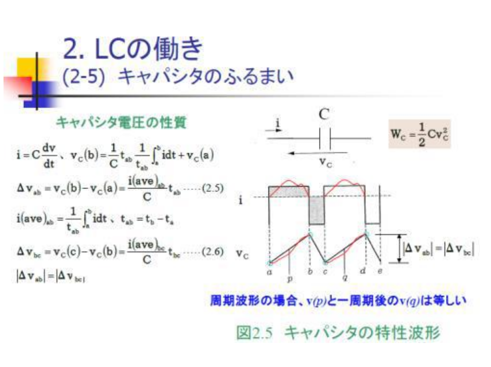
となり、98%の応答を示す。

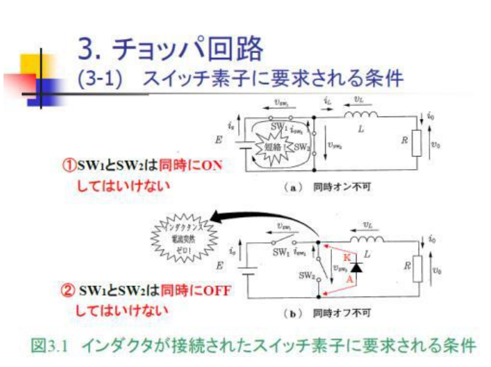
R=10Ω、L=30mHの場合、τ=L/R=30mH/10Ω=3ms。98%応答は4τ=12msである。

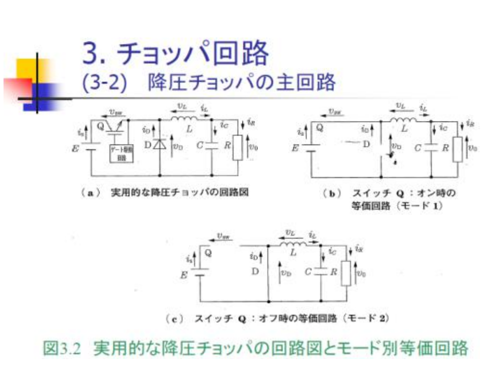
⑥【DC-DC 変換器】　講師：讓原逸男











3. チョッパ回路
(3-3) 降圧チョッパの動作波形

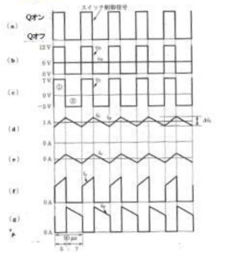


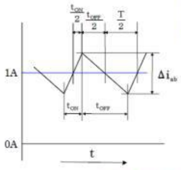
図3.2(a)のi_Lの変分電流Δi_Lは(2.3), (2.4)式のΔi_{ab},Δi_{bc}の関係式より

$$\Delta i_L = \Delta i_{ab} = \frac{V(ave)_{ab}}{L} t_{ab} = \frac{E - v_O}{L} t_{ON}$$
$$\Delta i_L = \Delta i_{bc} = \frac{-v_O}{L} t_{OFF} = \frac{-v_O}{L}(T - t_{ON})$$
$$|\Delta i_{ab}| = |\Delta i_{bc}| = (E - v_O)t_{ON} = v_O(T - t_{ON})$$
$$v_O = \frac{t_{ON}}{T} E = dE \cdots\cdots (3.1)$$

デューティ比をdとする

図3.3 降圧チョッパの動作波形
T=50μs,E=12V,vo=5V,L=700μH,R=5Ω

3. チョッパ回路
(3-4) 降圧チョッパの出力リップル電圧

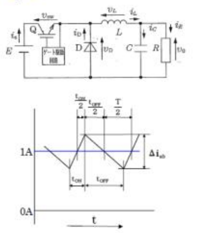


出力リップル電圧Δv_{ab}の関数式は図3.3(d)、(e)の波形と(2.5)式より導出可能。図3.3(d)を拡大した左図のΔi_{ab}を用いると、

$$\Delta i_C = \Delta i_L = \Delta i_{ab}$$
$$\Delta v_{ab} = \frac{i(ave)_{ab}}{C} t_{ab} = \frac{\Delta i_{ab}}{4C} \times \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{2} = \frac{\Delta i_{ab}}{8C} T \cdots\cdots (3.2)$$

図3.4 降圧チョッパにおけるΔv_{ab}の導出例

3. チョッパ回路
(3-5) 降圧チョッパ回路のL、C設計例



(1)図3.3の条件の場合
T=50μs,E=12V,vo=5V,L=700μH,R=5Ω
Δi_{ab}は(2.3)式より

$$d = \frac{v_O}{E} = \frac{5}{12} = 0.4167,\ T_{ON} = dT = 0.4167 \times 50 = 20.84\,\mu s$$
$$\Delta i_{ab} = \frac{V(ave)_{ab}}{L} t_{ab} \fallingdotseq \frac{E - v_O}{L} T_{ON} = \frac{12-5}{700} \times 20.84 = 0.208A$$
$$i_{L\text{-}rms} = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{ac}^2} = \sqrt{I_R^2 + \left(\frac{\Delta i_{ab}}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{1^2 + \left(\frac{0.208}{2\sqrt{3}}\right)^2} = 1.002A$$

$V_{O\text{-}ave} \fallingdotseq v_O$=5V、リップル電圧$\Delta v_{ab}$は、
$\Delta v_{ab}=0.02V_{O\text{-}ave}$ の条件で設計すると、
$\Delta v_{ab}=0.02V_{O\text{-}ave}=0.02\times5=0.1V$
Δi_{ab}は(3.2)式より、

$$C = \frac{\Delta i_{ab}}{8\Delta v_{ab}} T = \frac{0.208}{8 \times 0.1} \times 50 = 13.0\mu F$$

3. チョッパ回路
(3-6) 昇圧チョッパの主回路

モード1
$i_C \fallingdotseq -i_R$　、　$\gamma = \frac{\Delta v_{bc}}{v_O}$
$\Delta v_{bc} = \frac{i(ave)_{bc}}{C} t_{bc} = \frac{-i_R}{C} t_{ON}$

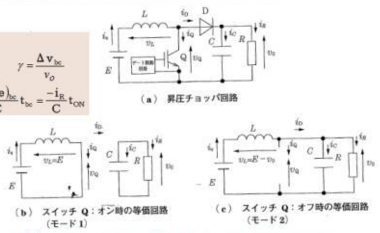


図3.5 昇圧チョッパの回路図とモード別等価回路

3. チョッパ回路
(3-7) 昇圧チョッパの動作波形

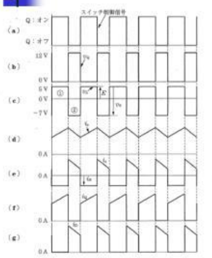
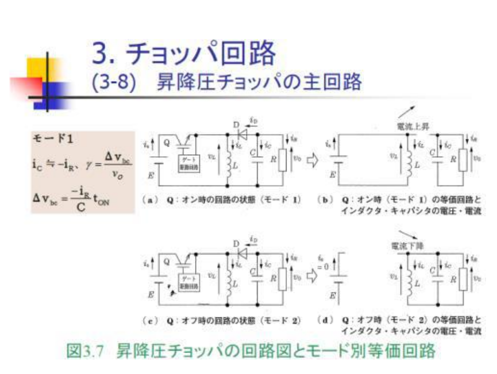


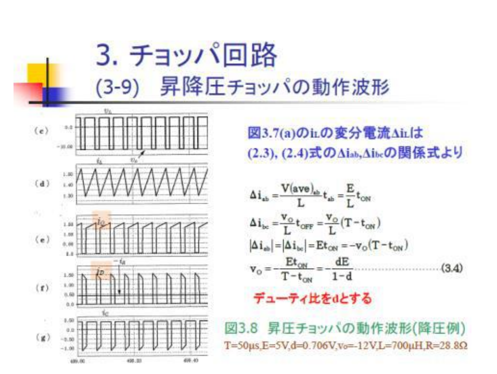
図3.5(a)のi_sの変分電流Δi_sは(2.3), (2.4)式のΔi_{ab},Δi_{bc}の関係式より

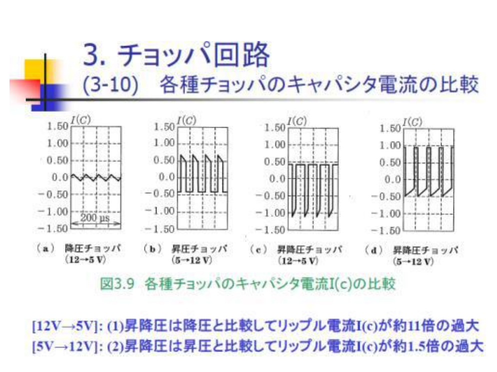
$$\Delta i_{ab} = \frac{V(ave)_{ab}}{L} t_{ab} = \frac{E}{L} t_{ON}$$
$$\Delta i_{bc} = \frac{E - v_O}{L} t_{OFF} = \frac{E - v_O}{L}(T - t_{ON})$$
$$|\Delta i_{ab}| = |\Delta i_{bc}| = Et_{ON} = (v_O - E)(T - t_{ON})$$
$$v_O = \frac{ET}{T - t_{ON}} = \frac{E}{1-d} \cdots\cdots (3.3)$$

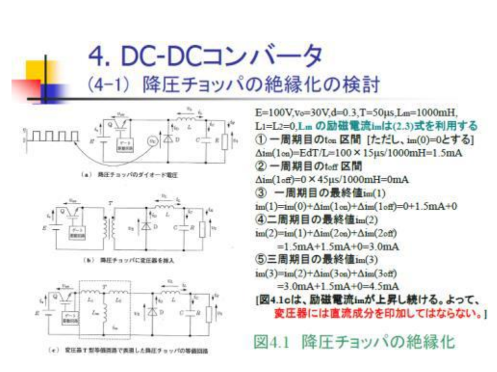
デューティ比をdとする

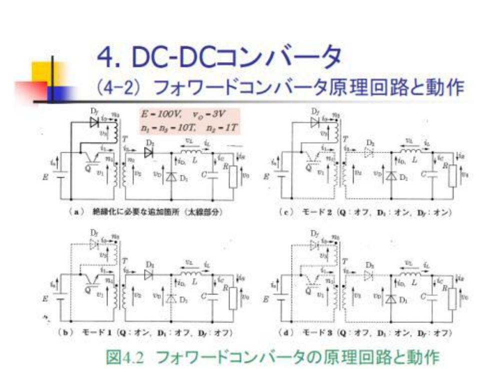
図3.6 昇圧チョッパの動作波形
T=50μs,E=5V,vo=12V,L=700μH,R=28.8Ω


3. チョッパ回路
(3-8)　昇降圧チョッパの主回路
モード1
$i_C \fallingdotseq -i_R$、$\gamma = \frac{\Delta v_{bc}}{v_O}$
$\Delta v_{bc} = \frac{-i_R}{C} t_{ON}$
(a) Q：オン時の回路の状態（モード1）
(b) Q：オン時（モード1）の等価回路とインダクタ・キャパシタの電圧・電流
(c) Q：オフ時の回路の状態（モード2）
(d) Q：オフ時（モード2）の等価回路とインダクタ・キャパシタの電圧・電流
図3.7　昇降圧チョッパの回路図とモード別等価回路


3. チョッパ回路
(3-9)　昇降圧チョッパの動作波形
図3.7(a)のiLの変分電流ΔiLは
(2.3), (2.4)式のΔiab,Δibcの関係式より
$\Delta i_{ab} = \frac{V(ave)_{ab}}{L} t_{ab} = \frac{E}{L} t_{ON}$
$\Delta i_{bc} = \frac{v_O}{L} t_{OFF} = \frac{v_O}{L}(T - t_{ON})$
$|\Delta i_{ab}| = |\Delta i_{bc}| = Et_{ON} = -v_O(T - t_{ON})$
$v_O = -\frac{Et_{ON}}{T - t_{ON}} = -\frac{dE}{1-d}$ ……(3.4)
デューティ比をdとする
図3.8　昇降圧チョッパの動作波形(降圧例)
T=50μs,E=5V,d=0.706V,vo=-12V,L=700μH,R=28.8Ω


3. チョッパ回路
(3-10)　各種チョッパのキャパシタ電流の比較
(a) 降圧チョッパ (12→5 V)
(b) 昇圧チョッパ (5→12 V)
(c) 昇降圧チョッパ (12→5 V)
(d) 昇降圧チョッパ (5→12 V)
図3.9　各種チョッパのキャパシタ電流I(c)の比較
[12V→5V]: (1)昇降圧は降圧と比較してリップル電流I(c)が約11倍の過大
[5V→12V]: (2)昇降圧は昇圧と比較してリップル電流I(c)が約1.5倍の過大


4. DC-DCコンバータ
(4-1)　降圧チョッパの絶縁化の検討
E=100V,vo=30V,d=0.3,T=50μs,Lm=1000mH,
L1=L2=0,Lm の励磁電流imは(2.3)式を利用する
①一周期目のton 区間 [ただし、im(0)=0とする]
Δim(1on)=EdT/L=100×15μs/1000mH=1.5mA
②一周期目のtoff 区間
Δim(1off)=0×45μs/1000mH=0mA
③一周期目の最終値im(1)
im(1)=im(0)+Δim(1on)+Δim(1off)=0+1.5mA+0
④二周期目の最終値im(2)
im(2)=im(1)+Δim(2on)+Δim(2off)
=1.5mA+1.5mA+0=3.0mA
⑤三周期目の最終値im(3)
im(3)=im(2)+Δim(3on)+Δim(3off)
=3.0mA+1.5mA+0=4.5mA
[図4.1cは、励磁電流imが上昇し続ける。よって、変圧器には直流成分を印加してはならない。]
図4.1　降圧チョッパの絶縁化


4. DC-DCコンバータ
(4-2)　フォワードコンバータ原理回路と動作
E=100V,　vO=3V
n1=n3=10T,　n2=1T
(a) 絶縁化に必要な追加箇所（太線部分）
(b) モード1 (Q：オン, D1：オフ, D2：オフ)
(c) モード2 (Q：オフ, D1：オン, D2：オン)
(d) モード3 (Q：オフ, D1：オン, D2：オフ)
図4.2　フォワードコンバータの原理回路と動作

4. DC-DCコンバータ
(4-3) フォワードコンバータの動作波形

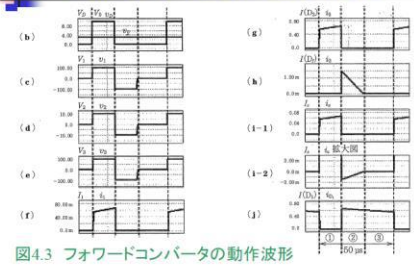


図4.3 フォワードコンバータの動作波形

4. DC-DCコンバータ
(4-4) フォワードコンバータの計算例

E=100V, n_1=10turn, n_2=1turn, n_3=10turn, F_s=20kHz, d=0.3,
L_m=10mH(n_2から見た値), L=1mH, C=500μF, R=5Ω

① [モード1]　図4.2(b) で(Q：ON)、(D_f& D_1：OFF) の状態
v_1=100V, v_2=10V, v_3=100V, v_o=d×v_2=0.3×10=3V, i_R=3V/5Ω=0.6A
図4.3(g,f)：i_2(ave)=i_R=0.6A, i_1(ave)=i_R×(n_2/n_1)=0.6×(1/10)=60mA
図4.3(g)：Δi_2=(v_2-v_o)×t_{on}/L =(10-3)×15μs/1mH =0.105A
図4.3(i-1)：Δi_s=Δi_2×(n_2/n_1)=0.105A×(1/10)=0.0105A
② [モード2]　図4.2(c) で(Q：OFF)、(D_f& D_1：ON)の状態
n_3から見た励磁インダクタンスL_{m3}はL_{m3}=L_m×(n_3/n_2)^2=10mH×(10/1)^2=1H
モード1でn_1の印加電圧Eによる励磁電流i_{m3}は、i_{m3}=E×ton/L_{m3}=100×15μs/1H=1.5mA
よって観測できるi_3は、i_3=Δi_3=-i_{m3}=-E×t_{reset}/L_{m3}, t_{reset}=1.5mA×1H/100=15μs
図4.3(h)：i_3=1.5mA, t_{reset}=15μs
図4.3(i-2)：i_s=-1.5mA , t_{reset}=15μs
③[モード2+モード3]　図4.2(c,d) で(D_2：OFF)、(D_1：ON)の状態
図4.3(j)：Δi_{D1}=-v_o×t_{off}/L =-3×35μs/1mH =-0.105A

4. DC-DCコンバータ
(4-5) フライバックコンバータ原理回路

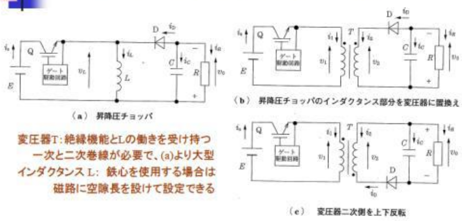


図4.4 フライバックコンバータの原理回路

4. DC-DCコンバータ
(4-6) プッシュプルコンバータの主回路

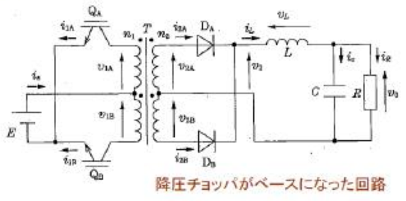
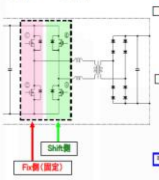


図4.5 プッシュプルコンバータの主回路

5. DC-DCコンバータの応用例
(5-1) 位相シフト方式DC-DCコンバータの原理

位相シフト制御



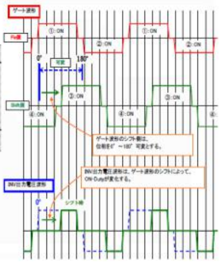
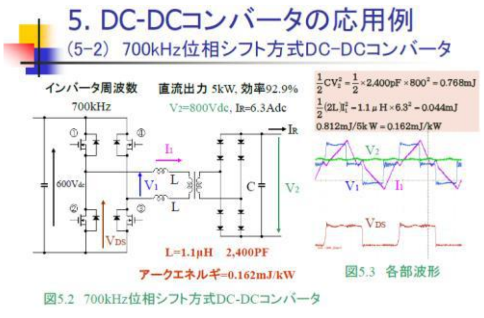
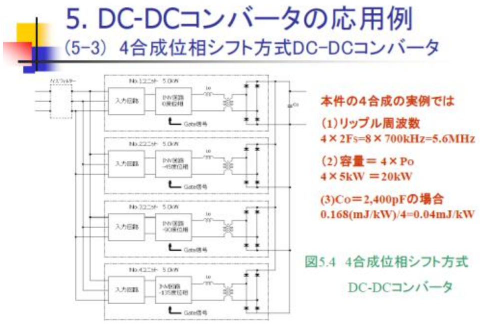


図5.1 位相シフト方式DC-DC
コンバータの原理回路

無断転用不可
主催：特定非営利活動法人YUVEC
後援：YNU 国立大学法人 横浜国立大学
協力：よこはま高度実装技術コンソーシアム(YJC)