

Electronique de puissance

pierre-jean.cottinet@insa-lyon.fr

Module ETEP3
Département de Génie Electrique
2015-2016

Organisation du module ETEP3-4GEA

- 27h de cours et TD
- 24h de TP (avec D. Audigier, J.-F. Capsal et G. Lefebvre)

- 1 devoir à la maison à mi-parcours
- 1 DS de 3h à la fin du semestre

- Evaluation : 60% DS et 40% TP et DM (*bonus-malus de -1 à +0,5*)

Plan du cours

1. Introduction
 2. La conversion DC/DC
 3. Les composants
 4. La conversion DC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion

Organisation du module ETEP3-4GE

- 10h de cours (J.Y. Gauthier)
- 16h de TD (avec C. Richard S1 et P.J. Cottinet (S2))
- 24h de TP (avec D. Audigier, J.F. Capsal P.J. Cottinet, C. Richard et S. Niu)

- 1 devoir à la maison à mi-parcours
- 1 DS de 3h à la fin du semestre

- Evaluation : 60% DS et 40% TP et DM (*bonus-malus de -1 à +0,5*)

Plan du cours

1. Introduction
 1. Classification
 2. Intérêts de l'électronique de puissance
 3. Exemples d'application
 4. Ce que sera ce cours / ce que ne sera pas ce cours
 2. La conversion DC/DC
 3. Les composants
 4. La conversion DC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion

Classification

Le but de l'électronique de puissance est de convertir de l'énergie électrique d'une forme en une autre. On distingue deux natures :

- continue (DC) : la puissance est transmise par la composante continue *Électronique, photovoltaïque, batteries, électrolyse,...*
- alternative (AC) : pas de composante continue

*Utilisation de transformateurs (transport et distribution, chauffage à induction,...)
Champs tournants dans les machines (moteurs, génératrices)*

AC/DC	- Redresseurs à diodes et thyristors (c.f. ETEP2) - Autres redresseurs
DC/DC	- Hacheurs
DC/AC	- Onduleurs assistés (c.f. ETEP2) - Onduleurs autonomes
AC/AC	- Gradateurs - Associations redresseur + onduleur - Convertisseurs matriciels, cycloconvertisseurs

Electronique de puissance ?

Différence entre électronique et électronique de puissance

A priori :

- Electronique = courants faibles
 - Electronique de puissance = courants forts
- Notion très relative!

Plutôt :

- Electronique = on s'intéresse plus à la qualité des signaux qu'au rendement
- Electronique de puissance = on s'intéresse plus au rendement qu'à la qualité des signaux

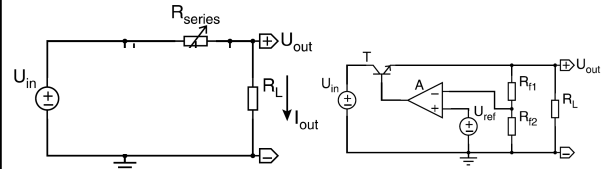
Exemple du DC/DC

Pour abaisser une tension → Un pont de résistances

Pour passer de 10V à 5V : $R_{series} = R_L$

$$\rightarrow \text{Rendement} : \eta = \frac{R_L I^2}{R_L I^2 + R_{series} I^2} = \frac{1}{2}$$

Exemple du régulateur linéaire série :



Concept du régulateur linéaire série.

Mise en œuvre du régulateur linéaire série.

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple du DC/DC

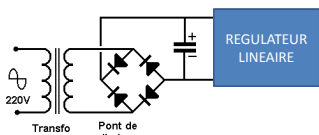
Cas précédent	Ce que l'on voudrait
Rendement potentiellement faible	Rendement le plus élevé possible
Une résistance (élément dissipatif)	Aucune résistance Mais possibilité d'utiliser des capacités et inductances
Transistor fonctionnant en zone linéaire	Transistor fonctionnant en zones saturée/bloquée (équivalent à un interrupteur)

9

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple du AC/DC

Comparaison entre deux blocs d'alimentation de téléphone
C'est du AC/DC avec un transformateur donc vous connaissez (ETEP2):



... Quasiment plus utilisé pour cette gamme de puissance et tension...
Maintenant on peut faire 2 fois plus puissant et :

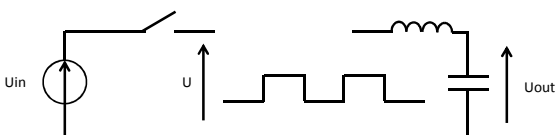
- plus petit
- plus léger
- avec un meilleur rendement
- consomme très peu à vide (donc chauffe très peu)
- plage de tension d'entrée 100-240V au lieu de 230V seulement avec une alimentation à découpage.

11

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple du DC/DC

On découpe temporellement



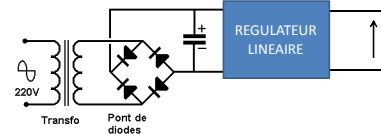
Filtrage des hautes fréquences pour récupérer la valeur moyenne

Dans le principe, il n'y a **aucun** élément dissipatif.
En pratique, les composants ont des défauts mais on peut tout de même atteindre des rendements élevés.

10

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple du AC/DC



Le dimensionnement des passifs dépend de la fréquence

- Bobine/transformateur
- Condensateur

$$U \cdot I = \pi \cdot f \cdot \frac{B^2_{max}}{\mu} \cdot V_{fer}$$

$$U \cdot I = \pi \cdot f \cdot \epsilon \cdot E^2_{max} \cdot V_{\epsilon}$$

Une alimentation à découpage va utiliser une fréquence plus importante
→ d'où une réduction de la taille des composants passifs

12

Intérêt de l'E.P.

L'E.P. est un métier du futur : ABB, Adéno, EADS, PSA, Renault, Safran, Schneider-Electric, Siemens, Alstom, recherchent des ingénieurs en E.P.

L'utilisation de l'E.P. permet à un système de :

- Réduire son volume, sa masse
- Augmenter sa fiabilité/sécurité/disponibilité
- Diminuer sa consommation
- Diminuer son coût
- Améliorer son facteur de puissance

Exemple de grands domaines d'innovation :

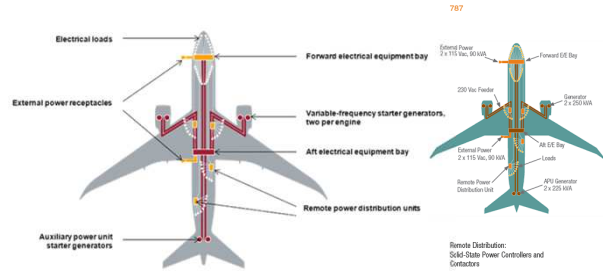
- Transports
- Réseaux de distribution
- Convertisseurs intégrés

13

Domaines applicatifs

- Transports : Aérien

Objectif : Avion plus électrique



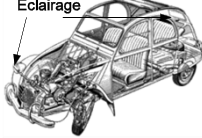
15

Domaines applicatifs

- Transports : Automobile

Electronique dans une voiture en 1950

Eclairage



Electronique dans une voiture en 2010



Augmentation de la partie électronique :

- Confort : chauffage, guidage, anti-patinage, assistances, ...
 - Sécurité : freinage, radars, ...
 - Moteur : amélioration du rendement du moteur
- Vers la traction électrique

14

Domaines applicatifs

- Transports : Aérien

Objectif : Avion plus électrique

Réduction des types de sources hydraulique et pneumatique
→ Augmentation de la puissance électrique transportée

Contraintes spécifiques au domaine de l'aéronautique :


- Température (haute et basse, cyclage), humidité et vibrations
- Fiabilité et disponibilité (tolérances de pannes)
- Maintenance (monitoring/ diagnostic ...)
- Economique : Petite voire Moyenne série

16

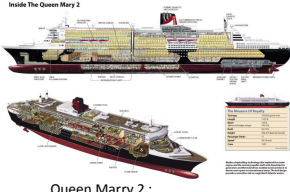
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

- Transports : Naval



Frégate Aquitaine:
Ptot = 42MW
dont 38 MW pour la propulsion



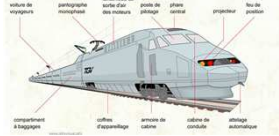
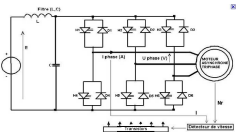
Queen Mary 2 :
Ptot = 118MW
dont 86 MW pour la propulsion

17

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

- Transports : Ferroviaire

Evolution des moteurs et de l'électronique de puissance associée :


- Hier : MCC associée à un redresseur (AC/DC) à thyristors : volumineux et rendement faible
- Aujourd'hui : Utilisation de MS ou MAS associée à un redresseur et un onduleur à MLI (évolution possible grâce aux progrès de l'électronique de puissance)

Remarque : MS moins volumineuse que la MAS mais plus coûteuse


INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs


- Transports : Ferroviaire




PSE: 12 moteurs CC 1.5kv
puissance 6.54 MW/25kV/1978-1985



TGV Réseau: 8 moteurs synchrones
puissance 8.8 MW/25kV/1992-1994



EUROSTAR: 12 moteurs asynchrones
puissance 12.24 MW/25kV/1994-1996



DUPLEX: 8 moteurs synchrones
puissance 9.28 MW/25kV/1995-2006

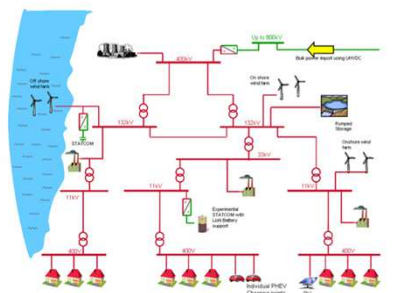
18

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

Distribution électrique, multiplication des sources d'énergie :

- actuelles : Nucléaire, Hydraulique, Thermique
- Energies renouvelables : Eolien (AC), Photovoltaïque (DC)



Réseau de transport et distribution actuel

20

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

Vers un réseau mixte AC et DC : stratégie ALSTOM Grid

21

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

Convertisseur buck DC-DC (p.242 du Wens/Stejaert).

23

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

- Convertisseurs pour les Systèmes sur une puce (SoC)

22

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Domaines applicatifs

Avec les valeurs :

Measured parameter	Value
Input voltage range U_{in}	2 V–2.6 V
Output voltage range U_{out}	1.1 V–1.5 V
Switching frequency range f_{SW}	30 Hz–300 MHz
Maximal power conversion efficiency η_{SW_max} @ $U_{in} = 2.6\text{ V}$; $U_{out} = 1.2\text{ V}$; $P_{out} = 220\text{ mW}$	52%
Output power range P_{out}	0 mW–180 mW
Power density P_{out_max}/A	53 mW/mm ²
Maximal output voltage ripple ΔU_{out_max}	110 mV

24

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Ce que sera ce cours Ce que ne sera pas ce cours

Objectifs:

- Connaître les architectures des convertisseurs classiques (B, B, BB, F, F, bras de pont, pont complet)
- Savoir calculer un taux d'ondulation, un rapport V_s/V_e ,...
- Avoir une méthode d'analyse pour comprendre le fonctionnement d'un convertisseur
- Connaître les principaux problèmes rencontrés et avoir en tête les solutions classiques
- Notions en commande/calcul de pertes/composants

Les composantes de l'électronique de puissance qui ne seront pas (ou peu) abordées :

- Architectures résonnantes, multiniveau, matricielles, isolées symétriques
- Composants actifs (physique des composants à semi-conducteur, technologies de fabrication, intégration, simulation éléments finis)
- Composants passifs (technologie condensateurs/bobines/transformateurs)
- Perturbations électromagnétiques
- Commande rapprochée (drivers)
- Commande plus haut niveau (pilotage de machine synchrone et asynchrone, PFC,...)
- Etude thermique

25

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck

Buck ou abaisseur de tension ou hacheur série ou dévolteur

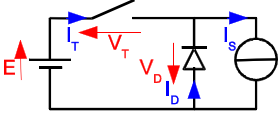


Schéma électrique simplifié

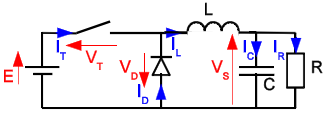


Schéma électrique réel

Durée de conduction de l'interrupteur : T_{ON} Période de hachage : T
Rapport cyclique : $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$

27

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 1. Hacheur Buck
 2. Hacheur Boost
 3. Bilan des hypothèses et principes utiles
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

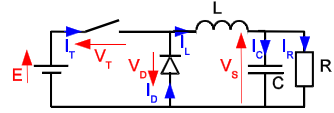
26

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck

Hypothèses d'étude :

- Régime établi (même état du système pour $t=0$ et pour $t=T$)
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux ($V_T=0$ ou $I_T=0$ et $V_D=0$ ou $I_D=0$)
- V_s est constant (c'est-à-dire que la capacité C est suffisamment grande)
- Régime de conduction continue ($I_L \neq 0$)



Deux phases de fonctionnement par période de hachage :

- **Phase 1 :** L'interrupteur T est fermé (ou passant ou saturé) pour $0 < t < \alpha T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_s=?$
- **Phase 2 :** L'interrupteur T est ouvert (ou bloqué) pour $\alpha T < t < T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_s=?$

28

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck

Principes utiles :

- Continuité du flux dans un circuit magnétique (ici : i_L ne peut pas subir de discontinuité)
- Valeur moyenne de V_L égale à zéro (car régime établi et $i_L(t=0)=i_L(t=T)$)

Mathématiquement : se démontre simplement, physiquement : L stocke autant d'énergie qu'elle n'en déstocke sur une période T.

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck (conduction discontinue)

Que se passe-t-il si $i_L=0$ lors de la phase 2 ?

Les phases 1 et 2 sont identiques mais :

- Apparition d'une phase 3 où D et T sont bloqués $i_T=i_D=i_L=0$
- $i_L(t=0)=i_{Lmin}=0$

Ondulation du courant : $\Delta I_L = I_{LMAX} = \frac{E-V_s}{L} \alpha T = \frac{V_s}{L} \alpha' T$

Relation entrée-sortie :

$$\langle I_R \rangle < I_L > = \frac{1}{2} I_{LMAX} (\alpha + \alpha') = \frac{1}{2} \left(\frac{E-V_s}{L} \alpha T \right) \frac{\alpha E}{V_s}$$

$$\frac{V_s}{E} = \frac{1}{1 + \frac{2 \langle I_R \rangle L}{\alpha^2 ET}}$$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck

Relations et contraintes :

- Relation entrée-sortie : $V_s = \alpha E$
- Bilan de puissance :
 - $P_{source} = E \cdot \langle I_T \rangle$
 - $P_{charge} = V_s \cdot \langle I_R \rangle$
 - $P_{source} = P_{charge} \rightarrow \langle I_T \rangle = \alpha \cdot \langle I_R \rangle$
- Ondulation de courant dans L :
 - $\Delta I_L = I_{LMAX} - I_{Lmin} = \frac{ET}{L} \alpha(1-\alpha)$
 - Ondulation maximale : $\Delta I_L (\alpha = 0,5) = \frac{ET}{4L}$
- Transistor :
 - $V_{TMAX} = E$
 - $I_{TMAX} = \langle I_R \rangle + \frac{ET}{2L} \alpha(1-\alpha)$
- Diode :
 - $|V_{DMAX}| = E$
 - $I_{DMAX} = \langle I_R \rangle + \frac{ET}{2L} \alpha(1-\alpha)$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck (limite de conduction continue/discontinue)

En posant : $x = \frac{\langle I_R \rangle L}{ET}$

- En conduction continue : $\frac{V_s}{E} = \alpha$
- En conduction discontinue : $\frac{V_s}{E} = \frac{1}{1 + \frac{2x}{\alpha^2}}$
- Limite de conduction continue/discontinue : $x = -\frac{1}{2} \left(\frac{V_s}{E} \right)^2 + \frac{V_s}{2E}$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck (conduction continue et V_S non constant)

Ondulation de tension? Problème posé sans hypothèses mathématiques :

signal carré de 0 à E avec un rapport cyclique α

$V_S(t)$ en régime établi
Puis calcul de $V_{S\text{MAX}} - V_{S\text{MIN}}$

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_E(t) - V_S(t) \quad C \frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - \frac{V_S(t)}{R}$$

Hypothèse simplificatrice : l'ondulation de V_S est petite par rapport à la valeur moyenne

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_E(t) - \langle V_S \rangle \quad C \frac{dV_S(t)}{dt} = I_C(t) = I_L(t) - \frac{\langle V_S \rangle}{R}$$

L'évolution du courant est alors la même que précédemment :

$I_C(t) = 0 \Rightarrow$ Extremums de V_S

33

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 1. Hacheur Buck
 2. Hacheur Boost
 3. Bilan des hypothèses et principes utiles
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

35

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck (conduction continue et V_S non constant)

Ondulation de tension?

signal carré de 0 à E avec un rapport cyclique α

$$\Delta V_S = \frac{\Delta Q}{C}$$

$$\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} I_C(t) dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta I_L}{2} (t_2 - t_1) \right)$$

$$\Delta I_L = \frac{E T}{L} \alpha (1 - \alpha)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{T}{2}$$

$$\Delta V_S = \frac{E T^2}{8LC} \alpha (1 - \alpha)$$

34

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur boost

Boost ou élévateur de tension ou hacheur parallèle ou survolteur

Schéma électrique simplifié

Schéma électrique réel

Durée de conduction de l'interrupteur : T_{ON} Période de hachage : T

Rapport cyclique : $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$

36

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur boost

Hypothèses d'étude :

- Régime établi
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux
- V_s est constant
- Régime de conduction continue ($I_L \neq 0$)

Deux phases de fonctionnement par période de hachage :

- **Phase 1** : L'interrupteur T est fermé pour $0 < t < \alpha T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_L = ?$
- **Phase 2** : L'interrupteur T est ouvert pour $\alpha T < t < T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_L = ?$

37

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur boost (conduction discontinue)

Que se passe-t-il si $I_L = 0$ lors de la phase 2 ?

Les phases 1 et 2 sont identiques mais :

- Apparition d'une phase 3 où D et T sont bloqués $I_T = I_D = I_L = 0$
- $I_L(t=0) = I_{Lmin} = 0$

Ondulation du courant : $\Delta I_L = I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T$

Relation entrée-sortie : $\alpha E + \alpha'(E - V_s) = 0 \quad \alpha' = \frac{\alpha E}{V_s - E}$

$\langle I_r \rangle \gg \langle I_D \rangle \gg \frac{1}{2} I_{LMAX} \quad \alpha' = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{L} \alpha T \right) \left(\frac{\alpha E}{V_s - E} \right)$

$$\frac{V_s}{E} = 1 + \frac{\alpha^2 ET}{2L \langle I_r \rangle}$$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur boost

Relations et contraintes :

- Relation entrée-sortie : $V_s = \frac{1}{1-\alpha} E$
- Bilan de puissance :
 - $P_{source} = E \langle I_L \rangle$
 - $P_{charge} = V_s \langle I_r \rangle$
 - $P_{source} = P_{charge} \rightarrow \langle I_L \rangle = \frac{1}{1-\alpha} \langle I_r \rangle$
- Ondulation de courant dans L :
 - $\Delta I_L = I_{LMAX} - I_{Lmin} = \frac{ET}{L} \alpha$
 - Ondulation maximale : $\Delta I_L (\alpha = 1) = \frac{ET}{L}$
- Transistor :
 - $V_{TMAX} = V_s$
 - $\langle I_T \rangle = \frac{\alpha}{1-\alpha} \langle I_r \rangle \quad I_{TMAX} = \frac{\langle I_r \rangle}{1-\alpha} + \alpha \frac{ET}{2L}$
- Diode :
 - $V_{DMAX} = V_s$
 - $\langle I_D \rangle = \langle I_r \rangle$
 - $I_{DMAX} = \frac{\langle I_r \rangle}{1-\alpha} + \alpha \frac{ET}{2L}$

38

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur boost (limite de conduction continue/discontinue)

En posant : $x = \frac{\langle I_r \rangle L}{ET}$

- En conduction continue : $\frac{V_s}{E} = \frac{1}{1-\alpha}$
- En conduction discontinue : $\frac{V_s}{E} = 1 + \frac{\alpha^2}{2x}$
- Limite de conduction continue/discontinue : $x = \left(\frac{V_s}{E} \right)^2 - 1 = 2 \left(\frac{V_s}{E} \right)^2$

39

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 1. Hacheur Buck
 2. Hacheur Boost
 3. Bilan des hypothèses et principes utiles
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

41

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

43

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hypothèses et principes utiles

Hypothèses d'étude :

- Régime établi (remis en cause lorsque l'on veut un modèle pour la commande)
- I_L constant (hypothèse très forte : L devient une source de courant, utile lors d'une 1^{ère} approche)
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux (remis en cause lorsque l'on veut calculer le rendement du convertisseur)
- V_S est constant (remis en cause pour calculer les ondulations de tension)
- V_S est quasi-constant (l'ondulation de tension est faible devant $\langle V_S \rangle$)
- Régime de conduction continue ($I_L \neq 0$) ou discontinue

Bilan des principes invoqués :


- Continuité du flux dans un circuit magnétique (ici : I_L ne peut pas subir de discontinuité lors d'une commutation)
- Conservation de la charge dans une capacité (ici : V_C ne peut pas subir de discontinuité lors d'une commutation)
- Valeurs moyennes de V_L et I_C égales à zéro (car régime établi)
- Raisonnement par l'absurde pour l'état des diodes et pour le signe des tensions de sortie et d'entrée

42


INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Connexions entre les sources

On appelle « source de tension » en électronique de puissance :




E




C

→ Pas de discontinuité de tension possible

On appelle « source de courant » en électronique de puissance :



I_L



L

→ Pas de discontinuité de courant possible

44

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Connexions entre les sources

Liaisons directes (hacheurs directs)

K1	K2	connexion
OFF	OFF	impossible
OFF	ON	c
ON	OFF	a
ON	ON	impossible

Si K1=interrupteur commandé et K2=diode → buck

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 1. Hacheur Buck-boost (ou à accumulation inductive)
 2. Hacheur à accumulation capacitive (Cuk, SEPIC)
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

47

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Connexions entre les sources

Liaisons directes (hacheurs directs)

K1	K2	connexion
OFF	OFF	impossible
OFF	ON	c
ON	OFF	a
ON	ON	impossible

Si K2=interrupteur commandé et K1=diode → boost

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck-boost

Buck-boost ou à accumulations inductive

Schéma électrique simplifié

Schéma électrique réel

Durée de conduction de l'interrupteur : T_{ON} Période de hachage : T
 Rapport cyclique : $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$

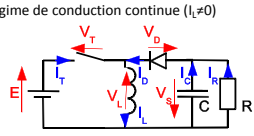
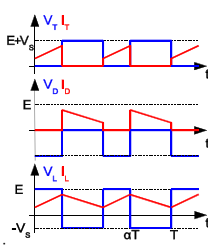
48

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck-boost

Hypothèses d'étude :

- Régime établi
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux
- V_S est constant
- Régime de conduction continue ($I_L \neq 0$)

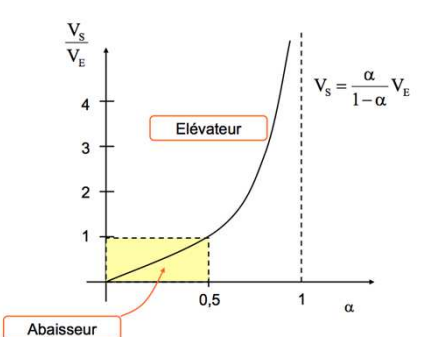
Deux phases de fonctionnement par période de hachage :

- Phase 1 : L'interrupteur T est fermé pour $0 < t < \alpha T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_L = ?$
- Phase 2 : L'interrupteur T est ouvert pour $\alpha T < t < T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $V_L = ?$

49

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck-boost



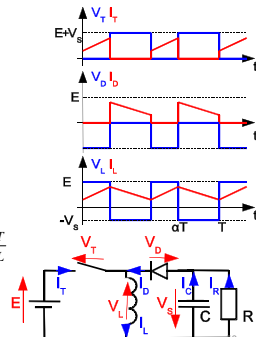
51

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck-boost

Relations et contraintes :

- Relation entrée-sortie : $V_S = \frac{\alpha}{1-\alpha} E$
- Bilan de puissance :
 - $P_{source} = E \langle I_T \rangle$
 - $P_{charge} = V_S \langle I_R \rangle$
 - $P_{source} = P_{charge} \rightarrow \langle I_T \rangle = \frac{\alpha}{1-\alpha} \langle I_R \rangle$
- Ondulation de courant dans L :
 - $\Delta I_L = \frac{\alpha E}{L}$
- Transistor :
 - $V_{TMAX} = E + V_S$
 - $\langle I_T \rangle = \frac{\alpha}{1-\alpha} \langle I_R \rangle$
 - $I_{TMAX} = \frac{\langle I_R \rangle}{1-\alpha} + \alpha \frac{ET}{2L}$
- Diode :
 - $V_{DMAX} = E + V_S$
 - $\langle I_D \rangle = \langle I_R \rangle$
 - $I_{DMAX} = \frac{\langle I_R \rangle}{1-\alpha} + \alpha \frac{ET}{2L}$



INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur buck-boost (conduction discontinue)

Que se passe-t-il si $I_L=0$ lors de la phase 2 ?

Les phases 1 et 2 sont identiques mais :

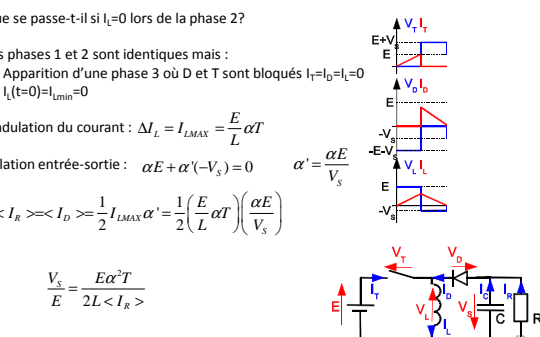
- Apparition d'une phase 3 où D et T sont bloqués $I_T = I_D = I_L = 0$
- $I_L(t=0) = I_{Lmin} = 0$

Ondulation du courant : $\Delta I_L = I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T$

Relation entrée-sortie : $\alpha E + \alpha'(-V_S) = 0 \quad \alpha' = \frac{\alpha E}{V_S}$

$\langle I_R \rangle \gg \langle I_D \rangle = \frac{1}{2} I_{LMAX} \alpha' = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{L} \alpha T \right) \left(\frac{\alpha E}{V_S} \right)$

$\frac{V_S}{E} = \frac{E \alpha^2 T}{2L \langle I_R \rangle}$



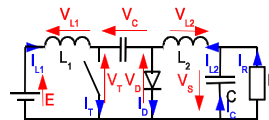
Plan du cours

1. Introduction
 2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 1. Hacheur Buck-boost (ou à accumulation inductive)
 2. Hacheur à accumulation capacitive (Ćuk, SEPIC)
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
 3. Les composants
 4. La conversion DC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion

Hacheur Ćuk

Hypothèses d'étude :

- Régime établi
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux
- V_s , V_c , I_{L1} et I_{L2} sont constants (hypothèses plus fortes que pour les autres hacheurs)



Deux phases de fonctionnement par période de hachage :

- Phase 1 : L'interrupteur T est fermé pour $0 < t < \alpha T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $I_c = ?$
- Phase 2 : L'interrupteur T est ouvert pour $\alpha T < t < T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase + $I_c = ?$



Hacheur Ćuk

Ćuk ou hacheur à accumulation capacitive

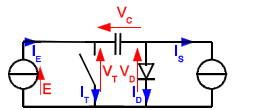


Schéma électrique simplifié

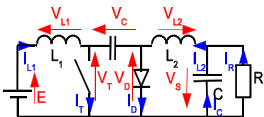
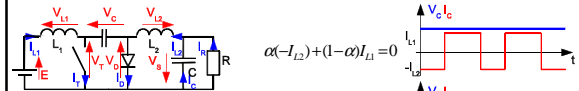


Schéma électrique réel

Durée de conduction de l'interrupteur : T_{on} Période de hachage : T
Rapport cyclique : $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$

Hacheur Ćuk

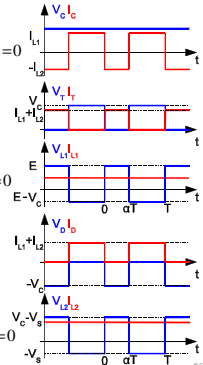


Conditions pour qu'un régime établi existe :

$$\begin{aligned} V_c &> 0 \\ I_{L1} &> 0 \\ I_{L2} &> 0 \\ V_s &> 0 \end{aligned} \quad \alpha E + (1-\alpha)(E - V_c) = 0$$

Relation entrée-sortie :

$$\begin{aligned} I_{L1} &= \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{L2} & V_s &= \alpha V_c \\ V_c &= \frac{E}{1-\alpha} & V_s &= \frac{\alpha}{1-\alpha} E \end{aligned} \quad \alpha(V_c - V_s) + (1-\alpha)(-V_s) = 0$$



INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Hacheur SEPIC

Single Ended Primary Inductor Converter : basé sur le concept du Ćuk mais avec une tension de sortie positive

Phase 1 : transfert d'énergie de la source vers L_1 de C_1 vers L_2

Phase 2 : transfert d'énergie de L_1 vers C_1 de L_2 vers la charge

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 1. Rappels sur le transformateur
 2. Flyback
 3. Forward
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

59

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Résumé hacheurs

	Buck	Boost	Buck-Boost	Ćuk	SEPIC
V_s/V_e (cond. continue)	α	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
V_s/V_e	abaisseur	élevateur	les deux	les deux	les deux
V_s/V_e	>0	>0	<0	<0	>0

58

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Alimentations à découpage isolées

Les hacheurs vus précédemment n'ont pas d'isolation électrique entre l'entrée et la sortie :

- Problème de sécurité pour faire une alimentation reliée à un réseau (ex. d'un chargeur d'ordinateur portable ou de téléphone),
- Dans le montage simple pour faire du DC faible tension à partir de AC 230V, il y a un transformateur qui abaisse la tension mais qui assure aussi l'isolation galvanique.

Dans ce cours, nous verrons deux convertisseurs DC/DC isolés dits asymétriques :

- Le Flyback : issue de la structure du hacheur Buck-Boost (accumulation inductive)
- Le Forward : issue de la structure du hacheur Buck (dévolteur)

Pour de plus fortes puissance (>500-1000W), il est préférable d'utiliser des structures isolées dites symétriques (push-pull, à demi-pont ou pont complet)

60

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Rappels sur le transformateur

$B = \mu H$
 $Hl = N_1 i_1 + N_2 i_2$
 $\phi = A_c B$
 $V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$

Hypothèses :

- Matériau ferromagnétique linéaire
- Champ H uniforme
- Pas de fuites magnétiques / conservation du flux
- Résistance des bobinages négligées

$\frac{\phi}{A_L} = N_1 i_1 + N_2 i_2$
 Inductance spécifique : $A_L = \frac{\mu A_c}{l} = \frac{1}{\mathfrak{R}}$

Perméabilité magnétique : μ
 Longueur spécifique du circuit magnétique : l
 Section du circuit magnétique : A_c

61

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Rappels sur le transformateur

Lorsque L_m a un rôle dans le fonctionnement du convertisseur (besoin d'un stockage d'énergie), on parlera d'inductance à deux enroulements ou d'inductances couplées.

Lorsque L_m n'a pas de rôle dans le fonctionnement du convertisseur (pas besoin d'un stockage d'énergie), on parlera de transformateur. L_m devient alors un défaut du transformateur, on cherchera à la maximiser.

63

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Rappels sur le transformateur

Hypothèses :

- Résistance des bobinages négligées (remis en cause si calcul du rendement)
- Matériau ferromagnétique linéaire (remis en cause si calcul du rendement ou dimensionnement du circuit magnétique)
- Pas de fuites magnétiques (remis en cause lorsque l'on s'intéresse à ce qu'il se passe précisément lors d'une commutation)

$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$
 $V_1 = L_m \frac{d(i_1 + m i_2)}{dt}$
 $L_m = N_1^2 A_L$

62

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 1. Rappels sur le transformateur
 2. Flyback
 3. Forward
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

64

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Flyback

Hacheur à accumulation inductive isolé

Schéma réel du buck-boost
Schéma électrique du flyback

Structure qui résulte du hacheur buck-boost :

- L'inductance est remplacée par une inductance à deux enroulements.
- On inverse les bornes afin d'obtenir une tension positive en sortie.
- Dans le buck-boost, c'est i_L qui ne subissait pas de discontinuité, dans le flyback, c'est le flux ϕ .
- On parlera donc ici de démagnétisation complète ou incomplète si le flux dans le circuit magnétique s'annule ou non.

65

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Flyback (démagnétisation incomplète)

Relations et contraintes :

- Relation entrée-sortie : $V_S = \frac{N_2}{N_1} \frac{\alpha}{1-\alpha} E$
- Bilan de puissance : $P_{source} = P_{charge} \rightarrow \langle I_T \rangle = \frac{N_2}{N_1} \frac{\alpha}{1-\alpha} \langle I_R \rangle$
- Ondulation du flux : $\Delta\phi = \phi_{max} - \phi_{min} = \frac{E}{N_1} \alpha T$
- Liens entre flux et courants :

Phase 1 :

$$\frac{\phi}{A_L} = N_1 i_T$$

$$I_{TMAX} = \frac{\phi_{MAX}}{N_1 A_L} \quad I_{Tmin} = \frac{\phi_{min}}{N_1 A_L}$$

Phase 1 :

$$\frac{\phi}{A_L} = N_2 i_D \quad i_{DMAX} = \frac{\phi_{MAX}}{N_2 A_L} \quad i_{Dmin} = \frac{\phi_{min}}{N_2 A_L}$$

67

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Flyback (démagnétisation incomplète)

Hypothèses d'étude :

- Régime établi
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux
- V_S est constant
- Démagnétisation incomplète ($\phi \neq 0$)

$$U_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad U_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \frac{\phi}{A_L} = N_1 i_T + N_2 i_D$$

Deux phases de fonctionnement par période de hachage :

- **Phase 1** : L'interrupteur T est fermé pour $0 < t < \alpha T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase
- **Phase 2** : L'interrupteur T est ouvert pour $\alpha T < t < T$
Etat de la diode D + Dessin simplifié de cette phase

66

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Flyback (démagnétisation incomplète)

Relations et contraintes :

- Flux maximum : $\langle I_R \rangle \gg \langle I_D \rangle \Rightarrow \frac{I_{DMAX} + I_{Dmin}}{2} (1-\alpha) = \frac{\phi_{MAX} + \phi_{min}}{2N_2 A_L} (1-\alpha)$
- Transistor : $V_{TMAX} = E + V_S/m$
 $I_{TMAX} = \frac{E}{2A_L N_1^2} \alpha T + \langle I_R \rangle > \frac{N_2}{N_1(1-\alpha)}$
- Diode : $|V_{DMAX}| = m \cdot E + V_S$
 $I_{DMAX} = \frac{E}{2A_L N_1 N_2} \alpha T + \langle I_R \rangle > \frac{1}{(1-\alpha)}$

68

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Flyback (démagnétisation complète)

Que se passe-t-il si $\phi = 0$ lors de la phase 2?
Comportement proche du buck-boost en conduction discontinue

TD

CONCLUSION sur le flyback

Comportement proche du buck-boost :

- Transfert d'énergie en 2 phases : stockage puis restitution
- Fonctionnement impossible à vide : démagnétisation impossible

Transformateur :

- Fonctionnement en inductances couplées
- permet d'isoler galvaniquement et d'ajouter un degré de liberté (le rapport de transformation m) pour la conception

→ intéressant par exemple pour faire des rapports V_d/E très grands ou très petits

69

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward

Schéma réel du buck

- Structure qui résulte du hacheur buck
- Présence d'un 3^{ème} enroulement et de la diode Dm pour démagnétiser le transformateur
- Présence de la diode DTR pour isoler l'étage de sortie lors de cette démagnétisation

71

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 1. Rappels sur le transformateur
 2. Flyback
 3. Forward
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

70

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

Hypothèses d'étude :

- Régime établi
- Les interrupteurs et diodes sont idéaux
- V_s est constant
- Régime de conduction continue pour L

$$U_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad U_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad U_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\frac{\phi}{A_L} = N_1 i_T - N_2 i_{DTR} + N_3 i_{Dm}$$

- **Phase 1** : L'interrupteur T est fermé pour $0 < t < \alpha T$

Etat des diodes + Dessin simplifié de cette phase

$$U_1 = E$$

$$V_{Dm} = -E - U_3 = -E \left(1 + \frac{N_3}{N_1} \right) < 0$$

72

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

- Phase 1
T fermé, Dm bloquée

$$U_1 = E$$

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} E$$

Raisonnement par l'absurde :
Supposons que la diode DTR est bloquée,
par continuité du courant : D passante
Donc : $U_2 = 0 \rightarrow$ impossible \rightarrow DTR est passante
 $V_{DTR} = U_2 > 0 \rightarrow$ DTR est passante : absurde
Donc la diode DTR est passante.

Flux : $\frac{d\phi}{dt} = \frac{E}{N_1}$ $i_T = \frac{\phi}{N_1 A_L} + \frac{N_2}{N_1} i_L$

Inductance L : $V_L = \frac{N_2}{N_1} E - V_S$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

- Phase 3
Le courant i_{Dm} s'annule \rightarrow Dm se bloque

$$\phi = 0$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = 0$$

$$V_T = E$$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

- Phase 2
L'interrupteur T est ouvert pour $\alpha T < t < T$

$$\frac{\phi}{A_L} = N_1 i_T - N_2 i_{DTR} + N_2 i_{Dm}$$

$$\begin{matrix} > 0 & \leq 0 & \geq 0 \end{matrix}$$

\rightarrow Par continuité du flux dans le transformateur, la diode Dm est passante

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{E}{N_3}$$

$$U_2 = -\frac{N_2}{N_3} E < 0$$

Raisonnement par l'absurde :
Supposons que la diode DTR est passante, alors
 $V_D = -U_2 > 0$ donc D est passante donc $U_2 = 0$
 \rightarrow impossible \rightarrow DTR est bloquée

$$\frac{\phi}{A_L} = N_2 i_{Dm}$$

Inductance L : $V_L = -V_S$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

Le transformateur fonctionne toujours en démagnétisation complète

Que se passe-t-il sinon?
La phase 3 n'existerait pas

Phase 1 : $\phi(\alpha T) - \phi(0) = \frac{E}{N_1} \alpha T$

Phase 2 : $\phi(T) - \phi(\alpha T) = -\frac{E}{N_3} (1 - \alpha) T$

Bilan : $\phi(T) - \phi(0) = E T \left(\frac{-1 + \alpha}{N_3} + \frac{\alpha}{N_1} \right)$

Régime établi si : $\alpha = \frac{N_1}{N_3 + N_1}$

Si $\alpha < \frac{N_1}{N_3 + N_1}$ alors, la phase 3 apparaît.

Si $\alpha > \frac{N_1}{N_3 + N_1}$ alors, le flux augmente continuellement, risque de destruction du transformateur.

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

Relations et contraintes :

- Relation entrée-sortie : $V_s = \frac{N_2}{N_1} \alpha E$
- Bilan de puissance : $P_{source} = P_{charge} \rightarrow < I_e > \frac{N_2}{N_1} \alpha < I_r >$
- Ondulation du flux : $\Delta \phi = \phi_{max} = \frac{E}{N_1} \alpha T$
- Transistor :

$$i_{TMAX} = \frac{\phi_{MAX}}{N_1 A_L} + \frac{N_2}{N_1} i_{LMAX}$$

$$I_{LMAX} = < I_r > + \frac{E}{2L} \frac{N_2}{N_1} T \alpha (1 - \alpha) \quad (\text{idem buck})$$

$$i_{TMAX} = \frac{E \alpha T}{N_1^2 A_L} + \frac{N_2}{N_1} < I_r > + \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{ET}{2L} \alpha (1 - \alpha)$$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction discontinue)

Comportement proche du convertisseur Buck

Attention à ne pas confondre la conduction continue/discontinue dans L et la démagnétisation complète/incomplète dans le transformateur

79

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

Relations et contraintes :

- Diode Dm : $|V_{DmMAX}| = E \left(1 + \frac{N_3}{N_1} \right) \quad |I_{DmMAX}| = \frac{\phi_{MAX}}{N_3 A_L}$
- Diode DTR :

$$|V_{DTRMAX}| = E \frac{N_2}{N_3} \quad |I_{DTRMAX}| = I_{LMAX}$$

- Diode D :

$$|V_{DMAX}| = E \frac{N_2}{N_1} \quad |I_{DMAX}| = I_{LMAX}$$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

CONCLUSION sur le forward

- Transformateur à 3 enroulements
- $\alpha \leq \frac{N_1}{N_3 + N_1}$ pour démagnétiser le circuit magnétique
- $V_{TMAX} = E \left(1 + \frac{N_1}{N_3} \right)$ exemple classique : $N_1 = N_3 \rightarrow V_{TMAX} = 2E$
- Fonctionnement en transformateur (l'inductance magnétisante est ici inutile pour le bon fonctionnement)
- permet d'isoler galvaniquement et d'ajouter un degré de liberté (le rapport de transformation m) pour la conception

→ intéressant par exemple pour faire des rapports V_s/E très petits


80

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Forward (conduction continue)

CONCLUSION sur le forward

- Plus forte puissance que le Flyback
- Mais plus faible puissance que les alimentations symétriques

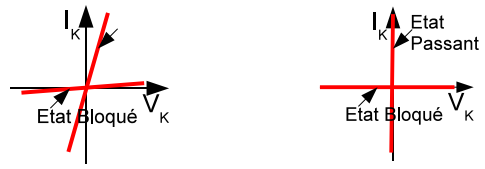


81

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Quand choisir une diode, un transistor, un thyristor ou une association de composants pour un interrupteur?



Interrupteur réel
Interrupteur idéalisé

83

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
 1. Choix du composant en fonction des segments
 2. Commutations forcée et naturelle
 3. Bras de pont
 4. Pont complet
 5. Autres architectures
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

82

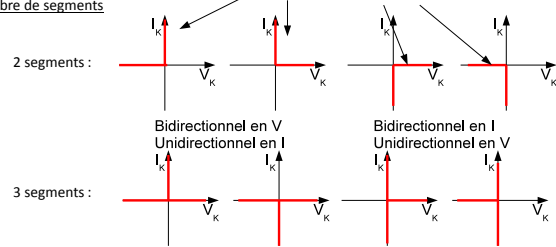
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant


Nombre de segments

Unidirectionnel en I et V


2 segments :



3 segments :



4 segments :



84

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Transitions

- Amorçage, déblocage, turn-on : établissement du courant
- Blocage, turn-off : interruption du courant

Caractéristiques dynamiques

- Commandée : action sur une électrode de commande
- Résistance équivalente : $0 \rightleftharpoons \infty$
- Point de départ et d'arrivée sur demi-axes de même signe

Blocage commandé

Amorçage commandé

85

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Cycle de fonctionnement : caractérise complètement l'interrupteur

- Caractéristique statique
- Modes de commutations

Diode : amorçage et blocage spontanés

Transistor (MOSFET, IGBT, bipolaire, thyristor-GTO) : amorçage et blocage commandés

87

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Caractéristiques dynamiques

- Commandée : action sur une électrode de commande
- Résistance équivalente : $0 \rightleftharpoons \infty$
- Point de départ et d'arrivée sur demi-axes de même signe

- Spontanée ou naturelle : ne dépend que du circuit extérieur (aucune action sur l'électrode de commande)

Commutation quand le point de fonctionnement passe par zéro

Brusque variation de la résistance au passage par 0

Point de départ et d'arrivée sur demi-axes de signes opposés

Blocage spontané

Amorçage spontané

86

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Interrupteurs à 3 segments

Thyristor : bidirectionnel en V et monodirectionnel en I
amorçage commandé et blocage spontané

Thyristor + diode en antiparallèle : bidirectionnel en I et monodirectionnel en V
amorçage commandé et blocage spontané

88

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Interrupteurs à 3 segments

Transistor + diode en antiparallèle: bidirectionnel en I et monodirectionnel en V
amorçage spontané dans un quadrant et amorçage/blocage commandé dans un autre quadrant

Transistor + diode en série: monodirectionnel en I et bidirectionnel en V
amorçage spontané dans un quadrant et amorçage/blocage commandé dans un autre quadrant

89

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Si on veut un courant négatif

$I_T < 0$
 $V_T > 0$ Signe opposé donc amorçage/blocage spontanés donc diode

$I_D < 0$
 $V_D < 0$ Même sens donc amorçage/blocage commandé donc transistor

→ Cela devient l'architecture du Boost.

91

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Exemple du hacheur buck

90

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Choix du composant

Si on veut un courant positif ou négatif (transfert de puissance bidirectionnel)

I_T bidirectionnel
 $V_T > 0$

Interrupteur 3 segments

I_D bidirectionnel
 $V_D < 0$

Interrupteur 3 segments

92

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Bras de pont

Dans les exemples précédents, on retrouve une architecture de ce type :

Lorsque les 2 interrupteurs de la cellule de commutation sont des ensembles (diodes+transistor), on l'appelle bras de pont :

Fonctionnement dans deux quadrants en sortie
Bidirectionnel en courant

93

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Autres architectures avec plusieurs interrupteurs commandés

96

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pont en H

On peut assembler plusieurs cellules de commutation pour obtenir la réversibilité en tension :

Fonctionnement dans les 4 quadrants
Bidirectionnel en courant et en tension

Fonctionnement dans 2 quadrants
Bidirectionnel en tension mais pas en courant⁹⁴

94

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
 1. Hacheurs directs et sans isolation
 2. Connexion entre les sources
 3. Hacheurs indirects
 4. Alimentations à découpage isolées
 5. Structures avec plusieurs interrupteurs commandés
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

96

Plan du cours

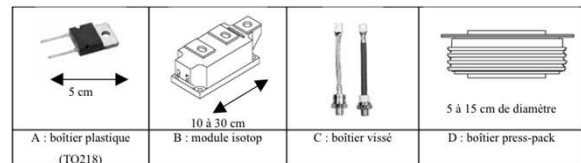
1. Introduction
 2. La conversion DC/DC
 3. Les composants
 1. Composants semi-conducteurs
 2. Composants passifs
 4. La conversion DC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion

97

Semi-conducteurs : Les diodes

- $U < 150V$: diodes Schottky ou bipolaire
- $U > 150V$: diodes bipolaires
- $U < 1200V$: nouvelles générations de diodes Schottky à base de matériau SiC

Différents types de boîtiers allant de 150V/10A jusqu'à 6500V/200A :



99

Semi-conducteurs

Deux types de conduction pour les dispositifs de puissance :

- Conduction unipolaire : 1 seul type de porteurs
 - Diode Schottky (jonction métal-semiconducteur)
 - Transistor MOSFET, COOLMOS, JFET, MESFET
 - Composants rapides
 - Peu de capacités en courant et tension
- Conduction bipolaire : 2 types de porteurs
 - Diode bipolaire (jonction p-n)
 - Transistor IGBT, BJT, Thyristor-GTO et thyristor
 - Bonnes capacités en courant et tension
 - Composants peu rapides

98

Semi-conducteurs : Les transistors MOSFET

- Tension maximale de 1200V voire 1700V pour des calibres en courant de l'ordre de 10A
- Une diode en antiparallèle est naturellement intégrée
C'est donc un interrupteur bidirectionnel en courant (3 segments)
- Nouvelle génération de MOSFET : les COOLMOS qui sont très peu résistifs
- Nouveaux transistors MOSFET à base de matériau SiC

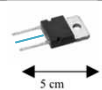
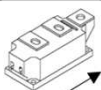
100

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Semi-conducteurs : Les transistors IGBT

- Tension allant de 600V (>100A) à 6500V
- Composant plus lent que le MOSFET
- Pas de diode en antiparallèle intégrée
C'est donc un interrupteur non-bidirectionnel en courant (2 segments), c'est pourquoi on y associe souvent une diode en anti-parallèle.
- Pour $U < 600V$, l'IGBT peut être bidirectionnel en tension

Différents types de boîtiers les plus répandus pour les IGBT :

	
A : boîtier plastique	B : module isotop

101

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Semi-conducteurs : Les transistors BJT et thyristors GTO

- BJT :
 - Commande en courant : coûteuse en puissance
 - Très peu utilisés
 - Interrupteurs 2 segments
- Thyristor GTO :
 - Applications très fortes puissances
 - Commande en courant
 - De plus en plus remplacé par l'IGBT

103

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

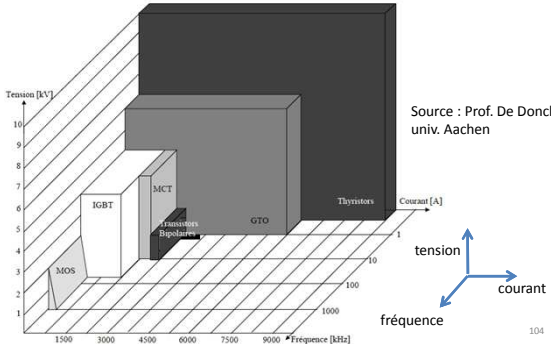
Semi-conducteurs : Les thyristors et triacs

- Thyristors :
 - Commandé uniquement à l'amorçage, blocage spontané
 - Composant pouvant être bidirectionnel en courant
 - Commande en courant
 - De moins en moins utilisé en faveur de l'IGBT
 - Application uniquement de très fortes puissances, $U_{max} = 10kV$
- Triac :
 - Composant conçu et utilisé en France
 - Composé de deux thyristors montés tête-bêche
 - Application dans la domestique : $U_{max} = 600V$
 - Interrupteur 4 segments

102

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Semi-conducteurs : Guide pour les transistors de puissance



The chart plots Tension [kV] on the vertical axis (1 to 10), Courant [A] on the horizontal axis (1 to 100), and Fréquence [kHz] on the depth axis (1500 to 9000). The regions are defined as follows:

- MOS**: High frequency, low voltage, low current.
- IGBT**: Medium frequency, medium voltage, medium current.
- BJT**: Low frequency, low voltage, low current.
- Transistors Bipolaires**: Low frequency, low voltage, low current.
- GTO**: Medium frequency, medium voltage, medium current.
- Thyristors**: Low frequency, high voltage, high current.

Source : Prof. De Doncker, univ. Aachen

104

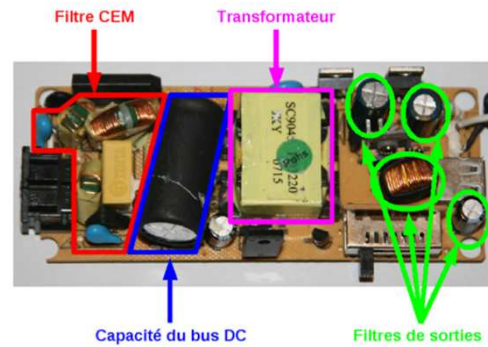
Plan du cours

1. Introduction
 2. La conversion DC/DC
 3. Les composants
 1. Composants semi-conducteurs
 2. Composants passifs
 1. Généralités
 2. Composants magnétiques
 3. Condensateurs
 4. La conversion DC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion

105

Composants passifs

Chargeur d'ordinateur portable



107

Composants passifs

Exemples d'utilisation

- Filtrage :
 - DC : variations brusques des tensions → fournir des tensions constantes
« filtrage sous tension continue »
 - AC : variations brusques des courants → absorber des courants sinusoïdaux
« filtrage sous tension alternative »
- Stockage d'énergie :
 - Fournir une tension de sortie constante à partir d'une source alternative
→ nécessité de stocker de l'énergie de manière transitoire
 - Fournir une puissance très importante pendant une durée très courte
→ stockage puis restitution brève
- Isolation galvanique (fournir une sortie dont la tension n'est pas référencée par rapport à l'entrée)
 - Protection des personnes
 - Mise en série de convertisseurs
 - Fréquence élevée → réalisation différente par rapport aux transformateurs réseau (50-60Hz)

106

Composants passifs

- Pourcentage significatif du volume d'un convertisseur
- Exemple : 3 tonnes de condensateurs par rame de TGV Eurostar
- Pourcentage significatif du prix d'un convertisseur

Composants magnétiques :

- Optimisation nécessaire pour réduire le coût et le volume
- Dimensionnement et fabrication sur mesure fréquents


Condensateurs :

- 90% des causes de panne dans les alimentations à découpage
- Beaucoup de technologies différentes

108

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Composants magnétiques



Auteur des figures : Cyril Buttay, Laboratoire Ampère

Choix à effectuer :

- Forme et taille du circuit magnétique
- Nature du matériau magnétique
- Nombre de spires
- Section des conducteurs
- Longueur de l'entrefer

109

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs : Généralités

Permittivité et Rigidité électrique

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e} \quad \epsilon_r : \text{permittivité relative}$$

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

$$k_r = \frac{U_{MAX}}{e} : \text{rigidité diélectrique}$$

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e} U_{MAX}^2 = \frac{\epsilon_0}{2} (\epsilon_r k_r^2) S e$$

111

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Composants magnétiques

Etude des pertes :

- Pour le rendement
- Pour la température

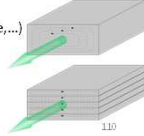
Origine des pertes :

- Pertes Joule
- Pertes Fer :
 - Courant de Foucault
 - Hystérésis

Les pertes fer varient en fonction de l'allure temporelle de l'induction, la valeur maximale de l'induction, la température et la fréquence
 → tôles Fe-Si (50-60Hz) non utilisables car trop de courants de Foucault à haute fréquence
 → Utilisation de matériaux à forte résistivité (ferrites, métal amorphe,...)

$$P_{fer} = K f^m B^n$$

1,3 < m < 1,6
 2 < n < 2,6

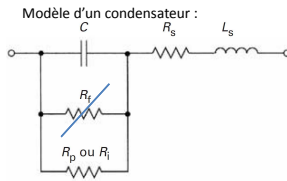


110

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

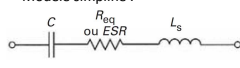
Condensateurs : Généralités

Modèle d'un condensateur :



- C condensateur parfait
- L_s inductance série
- R_s résistance de fuites
- R_p (ou R_i résistance d'isolement) résistance équivalente utilisée pour la définition des pertes diélectriques.
- R_s résistance série.

Modèle simplifié :



- Req (ou ESR) résistance équivalente (*Equivalent Serial Resistance*) utilisée pour la définition des pertes totales du condensateur à une fréquence donnée

112

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs : Généralités

Effet de l'inductance série :

En pratique : fréquence d'utilisation $< f_{res}/5$

The graph shows the impedance $Z(\Omega)$ on the y-axis (log scale from 10^{-2} to 10) versus frequency $f(\text{Hz})$ on the x-axis (log scale from 10^2 to 10^7). A curve starts at 10 for 10^2 Hz, decreases to a minimum R_s at 10^5 Hz, and then increases to 10 at 10^7 Hz.

113

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs : technologies

Quatre grandes familles de condensateurs :

- Condensateurs films
- Condensateurs céramiques
- Condensateurs électrolytiques
- Super-condensateurs

115

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs : Généralités

Angle de pertes

The diagram shows a phasor I at an angle δ to the voltage U . The active component is I_A and the reactive component is I_R .

Condensateur soumis à une tension alternative sinusoïdale

- I_A composante active du courant
- I_R composante réactive du courant

Pertes : $P=U \cdot I_A$
 Puissance réactive : $Q=U \cdot I_R$
 $\tan \delta = P/Q$
 δ est l'angle de pertes

- $\tan \delta$ est défini en régime sinusoïdal (la fréquence est précisée)
- $\tan \delta$ doit idéalement tendre vers 0 (ordre de grandeur $2 \cdot 10^{-4}$ à $100 \cdot 10^{-4}$)
- $\tan \delta$ donne une information sur la qualité du diélectrique en terme de pertes
- $\tan \delta$ dépend de la fréquence et de la température

114

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs films

The diagram shows a cross-section of a film capacitor with layers: Film 1, Film 2, Métallisation, Découpage, Marge d'isolation, Band renforcé, Diélectrique, and Schoopage.

Exemple de réalisation Schoopage (pulvérisation de zinc fondu sur les extrémités de bobinage)

source : Charles Joubert

116

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs films


- Très répandus en électronique de puissance
- Diélectriques utilisés : polypropylène, polyester, polymères,...
- Propriétés (exemple du polypropylène) :
 - $\epsilon_r = 2,2$
 - $\tan \delta = 2.10^{-4}$ (à 1 kHz 25°C)
 - $k_r = 600$ kV/mm
- Usages :
 - Filtrage
 - Découplage
 - Utilisation sous tension alternative (résonance, circuits d'aide à la commutation,...)
 - Haute tension jusqu'à 10kV

117

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs électrolytiques

- Diélectrique utilisé : l'alumine. Propriétés de l'alumine :
 - $\epsilon_r = 8,4$
 - $k_r = 850$ kV/mm
- Condensateurs polarisés
- Énergie volumique importante
- Faible fiabilité
- Pertes élevées
- Usages :
 - Filtrage sous tension continue



119

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Condensateurs céramiques

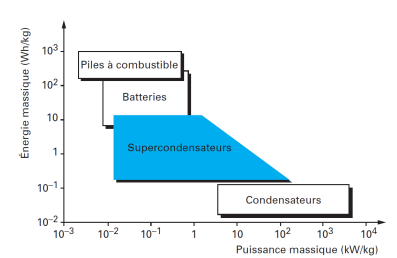
- Diélectriques utilisés : céramiques (oxyde de titane, oxyde de magnésium, titanate de baryum,...)
- Encore relativement coûteux
- Propriétés :
 - $\epsilon_r = 300-1200$
 - $\tan \delta = 250.10^{-4}$ (à 100 Hz 25°C)
 - $k_r = 30-500$ kV/mm
- Usages :
 - Filtrage
 - Alimentation à découpage basse tension (R_{req} et L_s très faibles)
 - Filtrage haute fréquence
 - Découpage haute tension

118

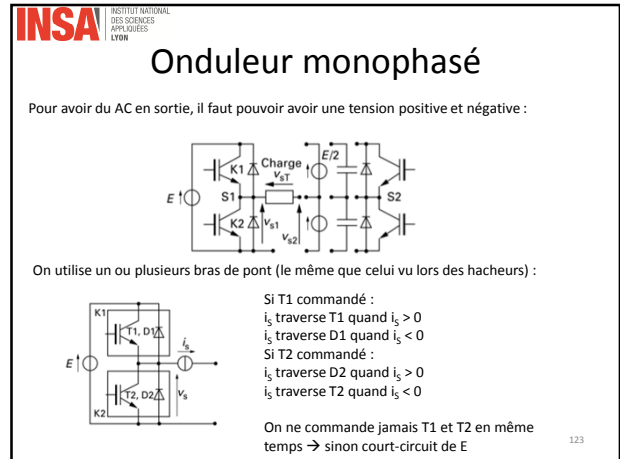
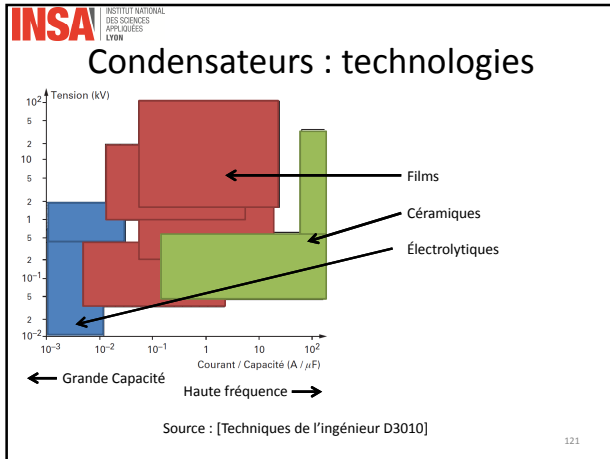
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Super-condensateurs

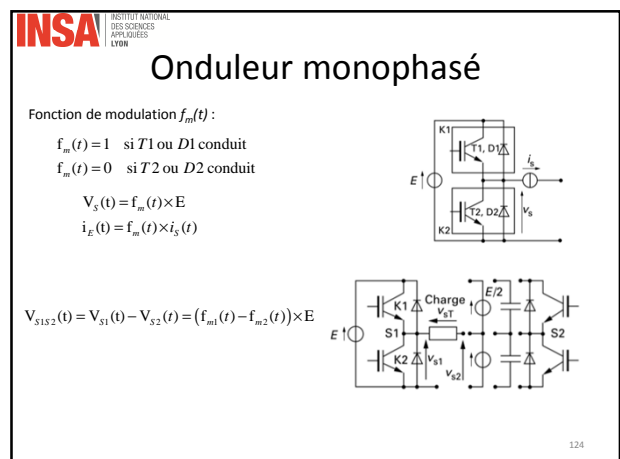
- Très fortes capacités : qq F à qq 10^4 F
- Très faibles tensions : environ 2,5V
- Très forts courants possibles
- Usage : stockage temporaire d'énergie



120



- INSA** INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON
- ## Plan du cours
1. Introduction
 2. La conversion DC/DC
 3. Les composants
 4. La conversion DC/AC
 1. Onduleur monophasé
 1. Pleine onde unipolaire et bipolaire
 2. MLI unipolaire et bipolaire
 2. Onduleur triphasé
 1. Pleine onde
 2. MLI intersective
 3. MLI vectorielle
 3. Conversion AC/DC et AC/AC
 5. Pertes dans un convertisseur
 6. Commande
- Conclusion
- 122



INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

$$V_{S1S2}(t) = V_{S1}(t) - V_{S2}(t) = (f_{m1}(t) - f_{m2}(t)) \times E$$

Commande pleine onde, mode bipolaire : $f_{m2}(t) = 1 - f_{m1}(t)$

$$V_{S1S2}(t) = (2f_{m1}(t) - 1) \times E$$

- Pas de réglage de l'amplitude du fondamental de la tension de sortie
- Seul réglage possible : la fréquence
- Harmoniques basses fréquences importants
- Peu de commutations par période
- Fondamental le plus grand possible avec ce convertisseur

125

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

$$V_{S1S2}(t) = V_{S1}(t) - V_{S2}(t) = (f_{m1}(t) - f_{m2}(t)) \times E$$

Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI), PWM en anglais

- Mode de commande le plus répandu
- Fréquence de commutation fixe
 - Calcul plus simple des pertes par commutation
 - Réalisation des filtres facilitée
- Proche de la commande vue précédemment sur les hacheurs en faisant varier le rapport cyclique au cours du temps

127

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

$$V_{S1S2}(t) = V_{S1}(t) - V_{S2}(t) = (f_{m1}(t) - f_{m2}(t)) \times E$$

Commande pleine onde, mode unipolaire : $f_{m2}(t) \neq 1 - f_{m1}(t)$

- Réglage de l'amplitude du fondamental par décalage des commandes des bras
- Meilleur taux de distorsion harmonique que la bipolaire

Mais toujours :

- Harmoniques basses fréquences importantes
- Peu de commutations par période

126

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Principe de la MLI sur un hacheur

$\alpha = 0,8$

Signal triangulaire à la fréquence $1/T = 1 \text{ kHz}$

128

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Principe de la MLI sur un hacheur

Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI), PWM en anglais

129

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

$$V_{S1S2}(t) = V_{S1}(t) - V_{S2}(t) = (f_{m1}(t) - f_{m2}(t)) \times E$$

Commande MLI, mode bipolaire : $f_{m2}(t) = 1 - f_{m1}(t)$

$$V_{S1S2}(t) = (2f_{m1}(t) - 1) \times E$$

$f_{m1}(t)$ est modulé à une fréquence de hachage (ex.: 1kHz) beaucoup plus grande que la fréquence voulue (ex.: 50Hz)

On obtient ainsi un $f_{m1}(t)$ moyenné qui est proche d'une sinusoïde comprise entre 0 et 1.

$$V_{S1S2}(t) = (2f_{m1}(t) - 1) \times E$$
 est alors une sinusoïde d'amplitude E sans composante continue

On peut alors régler l'amplitude et la fréquence de $V_{S1S2}(t)$ en changeant le signal de modulante (toujours centré en 0,5 si on souhaite du AC).

131

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

En combinant les principes :

- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) vue sur le hacheur
- Et structure de commande d'onduleur en pleine onde (unipolaire ou bipolaire)

On peut définir pour les onduleurs monophasés :

- La MLI unipolaire
- La MLI bipolaire

130

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

$$V_{S1S2}(t) = V_{S1}(t) - V_{S2}(t) = (f_{m1}(t) - f_{m2}(t)) \times E$$

Commande MLI, mode unipolaire : $f_{m2}(t) \neq 1 - f_{m1}(t)$

- On a maintenant deux variables distinctes qui sont modulées et qui agissent sur la valeur de la tension de sortie \rightarrow plusieurs possibilités
- Exemple : pour obtenir
$$V_{S1S2}(t) = \frac{E}{2}$$

on peut choisir :

$$f_{m1}(t) = 0,75 \quad f_{m1}(t) = 1 \quad f_{m1}(t) = 0,5$$

$$f_{m2}(t) = 0,25 \quad f_{m2}(t) = 0,5 \quad f_{m2}(t) = 0$$

- Le choix pourra se faire selon différents critères :
 - Simplicité de la réalisation
 - Nombre de commutations
 - Contenu harmonique

132

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

Commande MLI, mode unipolaire avec la même porteuse

133

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

135

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur monophasé

Commande MLI, mode unipolaire avec la même porteuse

La fréquence de sortie est doublée par rapport à la fréquence de découpage

134

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
 1. Onduleur monophasé
 1. Pleine onde unipolaire et bipolaire
 2. MLI unipolaire et bipolaire
 2. Onduleur triphasé
 1. Pleine onde
 2. MLI intersective
 3. MLI vectorielle
 3. Conversion AC/DC et AC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

136

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

On utilise trois bras de pont

Applications :

- variation de vitesse dans les machines à courant alternatif (MS ou MAS)
- fréquence variable
- Alimentations de secours
- fréquence fixe

On notera f_{mA} , f_{mB} , f_{mC} : les fonctions de modulation des bras A, B et C.

137

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

$$U_{AN} = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3}$$

$$U_{BN} = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3}$$

$$U_{CN} = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3}$$

8 configurations possibles :

	f_{mA}	f_{mB}	f_{mC}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AN}	U_{BN}	U_{CN}
0	0	0	0						
1	1	0	0						
2	1	1	0						
3	0	1	0						
4	0	1	1						
5	0	0	1						
6	1	0	1						
7	1	1	1						

139

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

Hypothèse : charge équilibrée, E constant, interrupteurs idéaux

Attention : N et O ne sont pas reliés !

$$U_{AN} = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3}$$

$$U_{BN} = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3}$$

$$U_{CN} = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3}$$

138

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé (pleine onde)

En pleine-onde, on utilise les 6 configurations non-nulles :

	f_{mA}	f_{mB}	f_{mC}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AN}	U_{BN}	U_{CN}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	E	0	-E	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$
2	1	1	0	0	E	-E	$E/3$	$E/3$	$-2E/3$
3	0	1	0	-E	0	E	$-E/3$	$2E/3$	$-E/3$
4	0	1	1	-E	0	E	$-2E/3$	$E/3$	$E/3$
5	0	0	1	0	-E	E	$-E/3$	$-E/3$	$2E/3$
6	1	0	1	E	-E	0	$E/3$	$-2E/3$	$E/3$
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

140

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé (pleine onde)

On peut représenter ces 6 configurations sous forme de vecteurs :

	f_{mA}	f_{mB}	f_{mC}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AN}	U_{BN}	U_{CN}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	E	0	-E	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$
2	1	1	0	0	E	-E	$E/3$	$E/3$	$-2E/3$

141

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé (MLI vectorielle)

Reprenons la représentation vectorielle des configurations en y ajoutant les configurations nulles

On définit 6 secteurs S_i
On projette la tension à appliquer sur les vecteurs configurations les plus proches
Exemple dans le secteur S_1 :

Sur une période T de MLI, on obtient les temps d'application :

- de la configuration 1 : T_1
- de la configuration 2 : T_2
- des configurations nulles 0 et 5 : $T - T_1 - T_2$

143

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé (MLI intersective)

Technique de MLI très simple à mettre en œuvre mais performances médiocres (cf. transparent sur la comparaison MLI intersective / MLI vectorielle)

142

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé (MLI vectorielle)

MLI vectorielle centrée

→ La répartition entre les configurations 0 et 5 est faite à parts égales
→ On ordonne les configurations pour avoir un seul bras qui change d'état à la fois
Exemple précédent : 1 pendant T_1 , 2 pendant T_2 et 0 ou 5 pendant $(T - T_1 - T_2)$

	0	1	2	5	2	1	0
f_{mA}	0	1	1	1	1	1	0
f_{mB}	0	0	1	1	1	0	0
f_{mC}	0	0	0	1	0	0	0
temps	$\frac{1-T_1-T_2}{4}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{1-T_1-T_2}{2}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{1-T_1-T_2}{4}$

144

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

Tensions sinusoïdales triphasées
 Dans le plan précédent, un système de tension sinusoïdal triphasé équilibré est représenté par un cercle.

Amplitude maximale : $U_{AN\ MAX} = \frac{E}{\sqrt{3}}$ Amplitude maximale : $U_{AN\ MAX} = \frac{E}{2}$ 145

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

Transformée de Concordia
 Pour n'importe quel point de ce plan, la somme des projections sur U_{AN} , U_{BN} et U_{CN} est nulle
 → Plan 2D suffit pour définir la combinaison des tensions triphasées
 → Pas d'homopolaire
 → On définit classiquement un repère α, β (V_α colinéaire à U_{AN} et V_β en quadrature)

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{pmatrix}$$

$K = \frac{2}{3}$ pour conserver les amplitudes
 $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$ pour conserver les puissances (on fait la même transformation pour les courants)

147

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Onduleur triphasé

Comment est-il possible d'avoir une tension plus grande avec une MLI vectorielle qu'avec une MLI intersective ?

148

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
 1. Onduleur monophasé
 1. Pleine onde unipolaire et bipolaire
 2. MLI unipolaire et bipolaire
 2. Onduleur triphasé
 1. Pleine onde
 2. MLI intersective
 3. MLI vectorielle
 3. Conversion AC/DC et AC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande

Conclusion

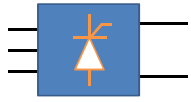
148

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

AC/DC

Redresseurs à diodes et/ou thyristors :

- Faible fréquence (pas de découpage)
- Harmoniques de courant en entrée importants (donc mauvais facteur de puissance)
- Harmoniques de tension en sortie basse fréquence

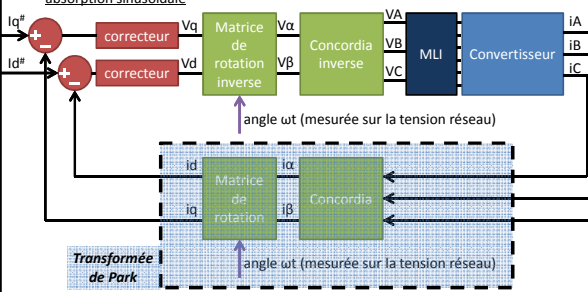


149

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

AC/DC

Schéma de principe simplifié d'une commande vectorielle d'un redresseur à absorption sinusoïdale



I_d^* I_q^* V_q V_d V_α V_β V_A V_B V_C i_A i_B i_C

correcteur **Matrice de rotation inverse** Concordia inverse MLI Convertisseur

angle ωt (mesurée sur la tension réseau)

i_d i_q i_α i_β

Transformée de Park Concordia

angle ωt (mesurée sur la tension réseau)

I_d : courant en phase avec la tension → puissance active
 I_q : courant en quadrature de phase avec la tension → puissance réactive

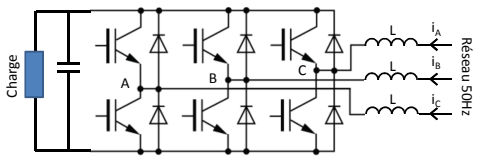
151

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

AC/DC

L'onduleur à transistors + diodes présenté précédemment est réversible en puissance, il peut donc être utilisé en redresseur.

Exemple : redresseur à absorption sinusoïdale



Charge Réseau 50Hz i_a i_b i_c

Il faut ajouter un système d'asservissement des courants :

- Mesure des courants + mesure d'une tension réseau
- On agit sur les commandes de bras d'onduleur pour obtenir des courants
 - sinusoïdaux
 - déphasés d'un angle ϕ avec les tensions réseaux

150

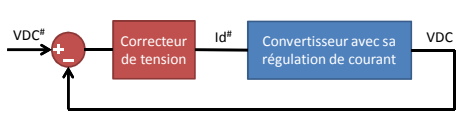
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

AC/DC

Schéma de principe simplifié d'une commande vectorielle d'un redresseur à absorption sinusoïdale

I_d : courant en phase avec la tension → puissance active
 I_q : courant en quadrature de phase avec la tension → puissance réactive

Souvent $I_q^* = 0$ et I_d^* est la sortie de commande d'une autre boucle de régulation sur la tension de sortie DC :



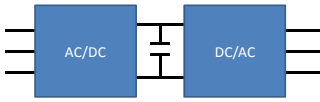
V_{DC}^* V_{DC} I_d^*

Correcteur de tension Convertisseur avec sa régulation de courant

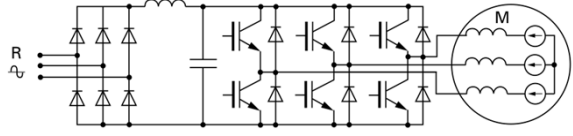
152

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

AC/AC



Exemple classique : variateur de vitesse pour machine synchrone ou asynchrone :



153

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pertes dans les passifs

Pertes dans les magnétiques :

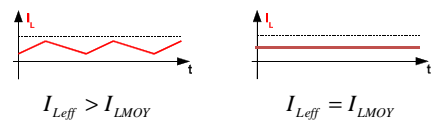
- Joule
- Fer

Pertes dans les condensateurs :

- liées au $\tan \delta$

Les ondulations de tension et de courant ont tendance à augmenter les pertes

Exemple des pertes Joule dans l'inductance d'un convertisseur boost

$$P_{\text{JOULE}} = R_L \cdot I_{\text{Leff}}^2$$


$I_{\text{Leff}} > I_{\text{LMOY}}$ $I_{\text{Leff}} = I_{\text{LMOY}}$

155

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
 1. Les pertes dans les composants passifs
 2. Les pertes dans les composants semi-conducteurs
 3. Pistes pour réduire les pertes
6. Commande

Conclusion

154

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pertes dans les semi-conducteurs

Pertes par conduction

- Lorsqu'un composant est passant, $P = V_{\text{CE}} \cdot I_D$
- Puissance dissipée faible mais sur un temps long

Pertes par commutation

- Au blocage et à l'amorçage, le produit $V_k \cdot I_k$ est non-nul
- Puissance dissipée importante sur un temps court

Etude thermique pour dimensionner le dissipateur

156

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pertes dans les semi-conducteurs

Exemple de calcul pour un hacheur buck

An example of average loss calculation
PRHMB100B12, $V_{cc}=600V$, $I_c=100A$, $R_G=10\Omega$, $V_{GE}=\pm 15V$, $f=10kHz$, Duty: 3:1

IGBT Steady-state Loss : $100(A) \times 2.2^2(V) \times 3/4 = 160(W)$
 Turn-on Loss : $9.5(m) \times 10(kHz) = 95(W)$
 Turn-off Loss : $9.5(m) \times 10(kHz) = 95(W)$
IGBT Loss in total : 350(W)

FWD Steady-state Loss : $100(A) \times 1.9^2(V) \times 1/4 = 47.5(W)$
 Switching (Reverse Recovery) Loss : $8.5(m) \times 10(kHz) = 85(W)$
FWD Loss in total : 132.5(W)

Module Loss 482.5(W)

*1 Collector-Emitter saturation voltage @ $I_c=100A$, $T_J=125^\circ C$
 *2 Forward voltage @ $I_f=100A$, $T_J=125^\circ C$

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pertes dans les semi-conducteurs

Exemple de calcul pour un hacheur buck

Contact thermal resistance $R_{th(c-f)}$
 Fin thermal resistance $R_{th(f-a)}$

Case temperature T_c
 Fin temperature T_f
 Ambient temperature T_a

Temperature difference between T_c and T_f and between T_f and T_a

$T_c - T_f$	$R_{th(c-f)} \times 482.5$
$T_f - T_a$	$R_{th(f-a)} \times 482.5$

159

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pertes dans les semi-conducteurs

Exemple de calcul pour un hacheur buck

Junction to Case Temperature Rise

IGBT $R_{th(j-c)} = 0.24^\circ C/W$

FWD $R_{th(j-c)} = 0.42^\circ C/W$

Case temperature T_c

Temperature Difference between T_c and T_j

IGBT	FWD
$84^\circ C$	$55.65^\circ C$
(350×0.24)	(132.5×0.42)

350W

132.5W

158

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Pistes pour réduire les pertes

Pertes par conduction
 → Choix d'un V_{ce} plus petit (ou R_{on} plus petit)
 → Hacheur synchrone – utilisation d'un transistor à la place d'une diode, utilisable en faible puissance

Pertes par commutation
 → Accélérer la commutation (choix de R_g)
 → Faire des commutation à faible courant (ZCS) ou à faible tension (ZVS)
 - Utilisation de circuits d'aide
 - Convertisseurs résonnants (exemple d'un ballast de lampe fluocompacte qui commute à zéro de tension)

Mains Inputs

AC/DC Rectifier

DC/AC Inverter

160

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande
 1. Commande rapprochée
 2. Exemple de commande de hacheurs
 3. Exemple de commande d'onduleurs, application à la commande des moteurs triphasés

Conclusion

161

Commande rapprochée

Le driver

Il apporte la puissance nécessaire pour faire commuter le transistor.

De plus, il peut avoir d'autres fonctions :

- Isolation optique
- Détection de court-circuit
- Détection de sur-courant
- ...

Le plus souvent, une résistance de grille est insérée entre le driver et le transistor

→ Elle permet de déterminer la dynamique de la commutation

163

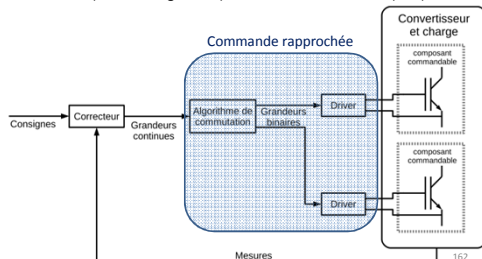
Commande rapprochée

Rôle du driver :

Transformer un ordre logique en tension et courant nécessaire pour la commutation du composant

Rôle de l'algorithme de commutation :

Transformer la commande (sortie du régulateur) en ordre de commutation (TOR)



162

Commande rapprochée

L'algorithme de commutation

Il transforme la commande (sortie du régulateur) en ordre de commutation (TOR)

Techniques courantes :

- Modulation de largeur d'impulsion (MLI / PWM)
- Fréquence fixe (réalisation des filtres facilitée, pertes par commutation constantes et spectre CEM étroit)
- Commande à temps de commutation fixe ($t_{ON} = \alpha T = \text{constant}$) et fréquence variable
- Commande directe : il n'y a pas d'algorithme de commutation, la sortie du correcteur est donc une commande Tout Ou Rien

164

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Commande rapprochée

Réalisation pratique d'une MLI

Réalisation analogique (vue précédemment) :

- Un oscillateur génère un signal triangulaire à la fréquence de modulation
- Ce signal est comparé à la sortie du correcteur (image du rapport cyclique)
- La sortie du comparateur est un signal TOR envoyé au driver

Réalisation numérique :

- Utilisation de timers et de compteurs (la largeur des impulsions est un multiple de la période du timer)
 - Utilisation de sorties spécifiques d'un microcontrôleur
 - FPGA
 - Circuits spécifiques

Les fonctions *asservissement*, *MLI* et *driver* peuvent être intégrées (2 fonctions ou les 3 fonctions) dans un seul composant spécifique.

165

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande
 1. Commande rapprochée
 2. Exemples de commande de hacheurs
 3. Exemple de commande d'onduleurs, application à la commande des moteurs triphasés

Conclusion

167

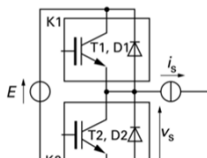
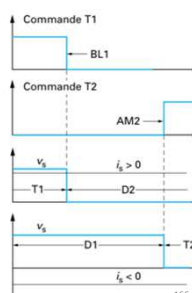
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Commande rapprochée

Temps mort

(dans le cas où plusieurs interrupteurs sont commandés)

- Fermeture simultanée de T1 et T2 = Court circuit
- Par sécurité, on ajoute un *temps mort* durant lequel T1 et T2 sont commandés à l'ouverture (ordre de grandeur : la μs pour un IGBT)
- Le signe du courant de sortie modifie la valeur de la tension de sortie

166

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

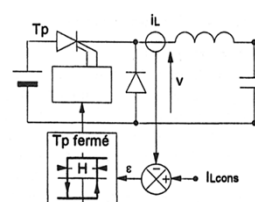
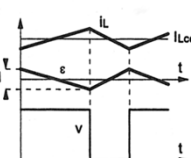
Exemple de commande d'un hacheur

Exemple A : asservissement en courant d'un hacheur buck avec *hystérésis*

→ Commande directe / sans algorithme de commutation

- Si $i_L < i_{Lcons} - \Delta I/2$ alors on ferme l'interrupteur et i_L augmente
- Si $i_L > i_{Lcons} + \Delta I/2$ alors on ouvre l'interrupteur et i_L diminue

Également appelée *commande en fourchette de courant*

168

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple de commande d'un hacheur

Exemple A : asservissement en courant d'un hacheur buck avec *hystérésis*

Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre
- Dynamique très rapide
- Robuste aux variations des paramètres

Inconvénients :

- Fréquence de commutation variable
 - Dépendante du point de fonctionnement
 - Spectre étalé, filtrage complexe
- Besoin d'une période d'échantillonnage élevée

169

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Plan du cours

1. Introduction
2. La conversion DC/DC
3. Les composants
4. La conversion DC/AC
5. Pertes dans un convertisseur
6. Commande
 1. Commande rapprochée
 2. Exemple de commande de hacheurs
 3. Exemple de commande d'un onduleur, application à la commande des moteurs triphasés

Conclusion

171

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple de commande d'un hacheur

Exemple B : asservissement d'un hacheur avec une MLI et un correcteur

Modèle moyen d'un buck (cf. module AU2)

→ Le hacheur avec la MLI devient un système continu

→ On peut utiliser les techniques classiques de Commande (PI, PID, commande par modèle interne, RST,...)

$$\frac{V_s}{\alpha} = \frac{E}{1 + \frac{L}{R}p + LCp^2}$$

Exemple : $f=3\text{kHz}$ $C=47\mu\text{F}$ $L=1\text{mH}$ $R=5\Omega$ $E=50\text{V}$

170

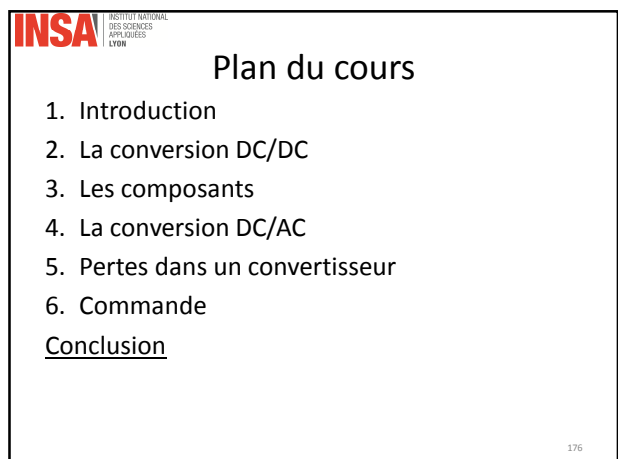
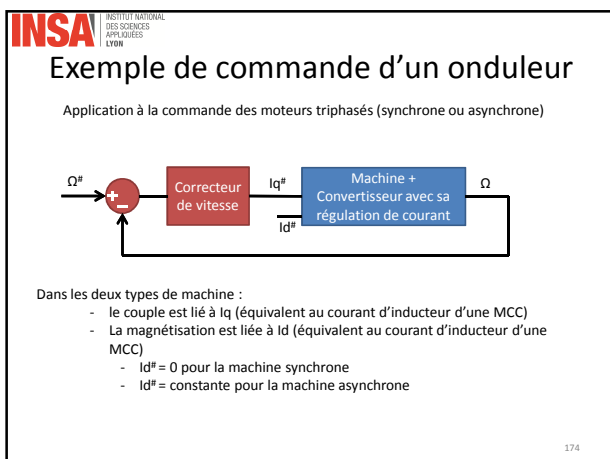
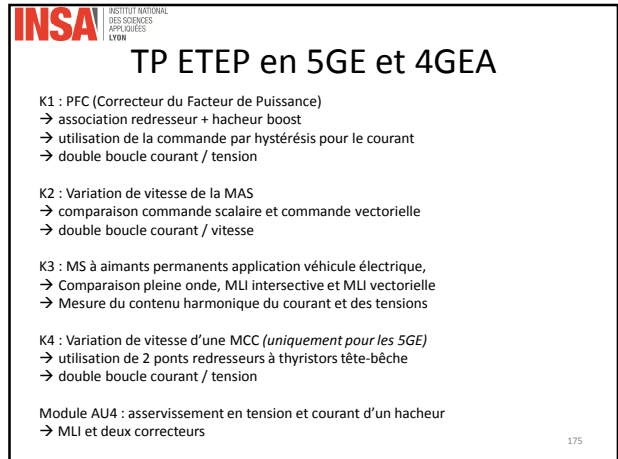
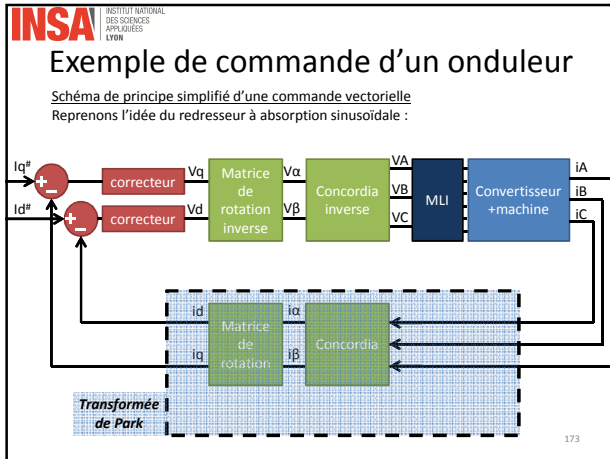
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Exemple de commande d'un onduleur

Application à la commande des moteurs triphasés (synchrone ou asynchrone)

Schéma d'un variateur de vitesse

172



INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Conclusion

AC/DC	- Redresseur : - à diodes et thyristors - à absorption sinusoïdale
DC/DC	- Hacheur : - transfert de la puissance direct ou indirect - avec ou sans isolation galvanique - réversible ou non en tension et/ou courant - utilisation symétrique ou non des magnétiques
DC/AC	- Onduleurs : - à thyristors (assistés) - à transistors (autonomes)
AC/AC	- Gradateurs - Associations redresseur + onduleur - Convertisseurs matriciels

→ avec des bons rendements (utilisation de transistors en commutation et éventuellement ZVS ou ZCS)
→ avec des bons facteurs de puissance (principe de l'absorption sinusoïdale)
→ à taille réduite
→ possibilité d'intégrer et de diminuer le coût pour des grandes séries

177

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

FIN

179

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Perspectives

- Augmentation de la fréquence (diminution de la taille des composants, commande rapide)
- Augmentation de la tenue en tension (utilisation en haute tension pour les réseaux)
- Tenue en température (comme dans les moteurs, la thermique est l'élément prépondérant dans le dimensionnement d'un convertisseur)
- Augmentation du nombre de composants pilotés par convertisseur : commande de plus en plus complexe
- Vers une plus grande intégration

178

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Bibliographie (à affiner et à diffuser en 2015-2016)

- Electronique de puissance. Structures, fonctions de base, principales applications, Guy Ségulier, Philippe Delarue, Francis Labrique, Collection: Sciences Sup, Dunod, 2011 - 9ème édition, EAN13 : 9782100567010 (version 2007 à la BU)
- Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires, Philippe Barrade (à la BU)
- Electronique de puissance - Cours, études de cas et exercices corrigés, Luc Lasne
- Convertisseurs et électronique de puissance: Commande, description, mise en œuvre, Michel Pinard
- Electronique de puissance: De la cellule de commutation aux applications industrielles, Alain Cunière, Gilles Feld, Michel Lavabre, Castella, 2012, ISBN : 271353254X, 9782713532542
- [1] Bruno Allard. L'électronique de puissance – Bases, perspectives, guide de lecture, volume D3060. Techniques de l'ingénieur, 2006.
- [2] Michel Lavabre. Electronique de puissance – cours et exercices résolus.Édualivre-Castella, 1998.
- [3] Jean-Marc Roussel. Problèmes d'électronique de puissance – 12 énoncés avec solutions détaillées. Dunod, 2003. (à la BU)
- [4] François Ferrière, Jean-Paul Forest. Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance – Principes, modélisation, composants. Masson, 2006. (à la BU)
- [5] Théodore Wildi. Electrotechnique. DeBoeck Université. 2005. (à la BU)
- [6] Jean-Louis Cocquerelle. Génie Électrique – du réseau au convertisseur Apprendre par l'exemple. Technip, 1996. (à la BU)
- [7] Ouvrage collectif. Articles de la base « Composants actifs », volume D3100 àD3122. Techniques de l'ingénieur, 2009.
- En anglais :
 - Iñaki Ramirez, Silva-Ortega. Control Design Techniques in Power Electronics Devices, 2006
 - Wens, Steven, Design, 2011
 - Mohan, Undeland, Robbins, 0471584088power_electronics

180