

SESSION 2014

**AGRÉGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Bâtiment à énergie positive

Le bâtiment étudié dans ce problème est un immeuble d'habitation de 8 étages conçu pour être situé dans l'agglomération grenobloise. Une partie de ce bâtiment à énergie positive a participé en septembre 2012 au Solar Decathlon Europe, concours international durant lequel 18 habitats de ce type se sont confrontés pendant deux semaines sur des critères architecturaux, économiques, environnementaux et énergétiques. C'est ce projet, nommé Canopea, porté par le Team Rhône Alpes qui a remporté la victoire. Le bâtiment ayant concouru est présenté Figure 1 (b). Il préfigure ce que pourrait être un étage d'habitation et un dernier étage de communs d'un ensemble d'immeuble d'habitation présenté Figure 1 (a).



Figure 1 : Projet Canopea.

La toiture du dernier étage est recouverte de panneaux photovoltaïques permettant de fournir une partie de l'énergie électrique nécessaire au bâtiment. Cette installation est complétée par un élément de stockage réalisé en technologie Lithium Fer Phosphate (LiFePO_4) permettant de lisser la consommation du bâtiment durant la journée. Il est ainsi possible d'effacer la consommation de celui-ci durant les heures de pointe (début et fin de journée) ou de lui assurer de l'autonomie en cas de perte du réseau de distribution. Le tout est relié au réseau de distribution. La Figure 2 présente le synoptique général de cette installation. Il est à noter que ce synoptique représente ce qui a été réalisé pour le concours Solar Decathlon Europe et non ce qui serait réalisé dans le cadre d'une installation à l'échelle d'un immeuble. En effet la distribution serait alors, entre autres, triphasée.

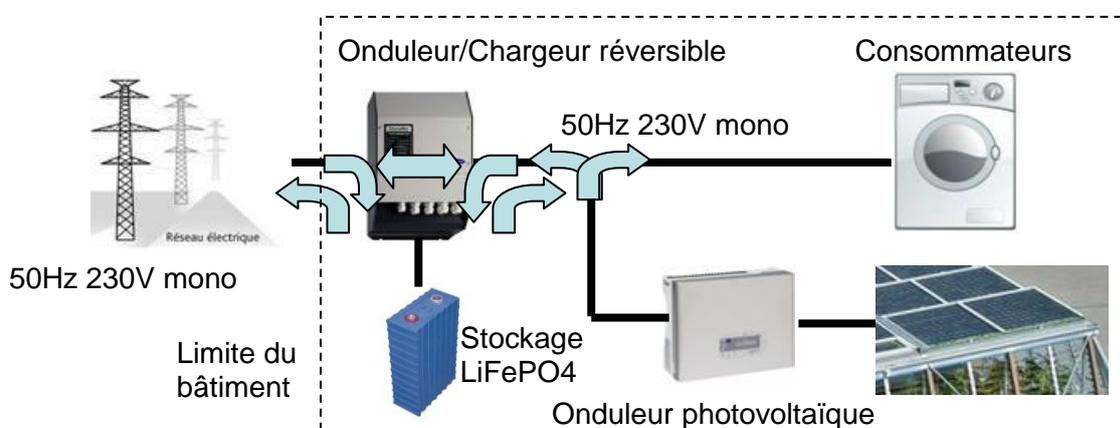


Figure 2 : Synoptique général de l'installation électrique du bâtiment. Les flèches indiquent les sens possibles de transfert de l'énergie.

Plusieurs types de fonctionnements sont donc accessibles :

- Le fonctionnement normal pour lequel la consommation du bâtiment est assurée par le réseau et les panneaux photovoltaïques. La consommation peut être positive ou négative selon la production photovoltaïque et la consommation. Durant cette phase de fonctionnement il est possible de recharger la batterie de stockage.
- Le fonctionnement en effacement heures de pointe durant lequel tout ou partie de la consommation des charges du bâtiment est compensée par la batterie. L'onduleur chargeur fonctionne alors en injection.
- Le fonctionnement îloté ou autonome durant lequel le bâtiment est alimenté par la batterie et la production photovoltaïque si elle existe. Ce mode de fonctionnement ne sera utilisé qu'en cas de coupure sur le réseau de distribution. Durant ce mode de fonctionnement seules les charges indispensables seront autorisées afin d'augmenter l'autonomie de l'ensemble.

Le problème proposé ici est décomposé en 4 parties indépendantes. Il est donc conseillé de le lire entièrement avant de le commencer. Ces 4 parties traiteront :

- du dimensionnement de l'installation photovoltaïque pour la première,
- du fonctionnement et du dimensionnement de l'onduleur photovoltaïque pour la seconde,
- de la réalisation de la batteries et du (Battery Management System) BMS pour la troisième
- et du fonctionnement et du dimensionnement de l'électronique de puissance du BMS pour la dernière.

Sommaire

A- DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE	5
A-1 Evaluation des capacités de production et choix de connexions	5
A-2 Influence des ombrages sur les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque	6
B- ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE	8
B-1 Dimensionnement de l'étage onduleur	9
B-2 Estimation des pertes de l'onduleur	10
B-3 Dimensionnement et estimation des pertes de l'étage MPPT	10
C- PACK BATTERIE ET BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)	12
D- CONVERTISSEUR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB)	16

Notations utilisées :

- lettre minuscule x : valeur électrique instantanée,
- lettre majuscule soulignée \underline{X} : grandeur complexe (tension, courant, impédance),
- lettre majuscule X : valeur constante ou valeur efficace ou module d'une grandeur complexe ($V=|V|$),
- la notation $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable x ,
- la notation \hat{x} désigne la valeur maximale,
- j est l'opérateur complexe.
- p variable de Laplace

Liste des principales grandeurs utilisées :

V_{PV} : tension délivrée par un panneau photovoltaïque
 i_{PV} : courant délivré par un panneau photovoltaïque
 p_{PV} : puissance délivrée par un panneau photovoltaïque
 V_{cell} : tension délivrée par une cellule photovoltaïque
 i_{cell} : courant délivré par une cellule photovoltaïque
 p_{cell} : puissance délivrée par une cellule photovoltaïque (P désignant la puissance moyenne)
 $V_{cellombre}$: tension délivrée par une cellule photovoltaïque ombrée
 $i_{cellombre}$: courant délivré par une cellule photovoltaïque ombrée
 $p_{cellombre}$: puissance délivrée par une cellule photovoltaïque ombrée (P désignant la puissance moyenne)
 E_C : tension du bus continu de l'onduleur
 E_{MPPi} : tension d'entrée de la i ème entrée MPPT de l'onduleur photovoltaïque
 I_{MPPi} : courant d'entrée de la i ème entrée MPPT de l'onduleur photovoltaïque
 ΔI_{MPPi} : ondulation du courant d'entrée de la i ème entrée MPPT de l'onduleur photovoltaïque
 i_{C1}, i_{C2} : courants circulant dans les condensateurs C_1 et C_2 de l'onduleur
 V_{rs} : tension réseau
 V_C : tension de sortie du convertisseur AC-DC avant le filtre
 F_R, ω : fréquence et pulsation des courants et tensions du réseau d'alimentation
 i_{LS} : courant de sortie de l'onduleur
 i_{SR} : courant de sortie du filtre de sortie
 i_{TA}, \dot{i}_{TA} : courants dans l'IGBT T_A et la diode D_A de l'onduleur
 L_r : inductance de la ligne

α_{MPPi} : rapport cyclique du i ème hacheur de l'onduleur photovoltaïque
 β : rapport cyclique de la commande MLI de l'onduleur
 δ : rapport de décalage des commandes du convertisseur DAB

F_D, T_D : fréquence et période de découpage du convertisseur DAB

F_{Do}, T_{Do} : fréquence et période de découpage de l'onduleur

L_S, C_S : inductance et condensateur du filtre de sortie de l'onduleur

L_{Ei} : inductance du ième hacheur MPPT de l'onduleur photovoltaïque

r : profondeur de modulation

E_{ON}, E_{OFF}, E_{COM} : énergies de commutation à l'amorçage, au blocage et totale d'un bras d'onduleur

N_e : nombre d'éléments de la batterie

I_{charge} : courant de charge de la batterie

U_{Ci} : tension aux bornes du ième élément de batterie

U_{CO} : tension aux bornes du condensateur d'équilibrage du BMS

N_P : nombre de spires primaires

N_S : nombre de spires secondaires

V_1, I_1, V_2, I_2 : tensions et courants au primaire et au secondaire du transformateur

V_e, I_e, V_s, I_s : tensions et courants en entrée et en sortie du convertisseur DAB

p_{DAB} : Puissance transitant par le convertisseur DAB (P désignant la puissance moyenne)

L_1, L_2 : inductances propres des bobinages primaires et secondaire du transformateur

M : mutuelle inductance entre les bobinages du transformateur

k : coefficient de couplage du transformateur

L_m, L_f : inductances du schéma équivalent du transformateur

m : rapport de transformation du schéma équivalent du transformateur

Liste des abréviations couramment utilisées :

- BMS : Battery Management System
- MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion
- SC : Semi-conducteurs
- DAB : Dual Active Bridge
- MPPT : Maximum Power Point Tracking

A- DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

A-1 Evaluation des capacités de production et choix de connexions

Q1. La zone utile de toiture permettant la pose de panneaux photovoltaïques est de $9 \times 9 \text{m}^2$. Déterminer approximativement le potentiel photovoltaïque de cette toiture en kWh par an pour une réalisation en technologie monocristalline d'un rendement de 14% sachant que l'irradiation solaire sur un plan horizontal est $3,67 \text{kWh/m}^2$ par jour en moyenne. On négligera ici l'inclinaison de 5° de la toiture et l'orientation de celle-ci.

L'installation est constituée de 36 modules SW 250 mono dont les caractéristiques sont données en annexe 1

Q2. Déterminer la puissance crête que cette installation est susceptible de fournir.

Q3. Indiquer à quoi correspondent les grandeurs typiques : U_{oc} , I_{cc} , U_{mpp} , I_{mpp} indiquées sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque SW 250 mono. Les placer sur la caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau du document réponse DR1.

Q4. Indiquer dans quelles conditions d'ensoleillement et de température les U_{oc} , I_{cc} , U_{mpp} , I_{mpp} sont indiquées en annexe 1. La puissance déterminée question Q2 est-elle un maximum que l'installation ne pourra pas dépasser ? Justifier votre réponse.

Q5. Représenter sur le document réponse DR1 la caractéristique $p_{PV}(V_{PV})$ puissance délivrée par un panneau photovoltaïque en fonction de la tension délivrée par le panneau. Indiquer les coordonnées du point de puissance maximum.

Q6. Représenter sur le document réponse DR2 les évolutions de la caractéristique $i_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque lorsque l'irradiation solaire diminue de 50% à température constante (courbe a), lorsque la température des cellules augmente de 25°C à 70°C à irradiation solaire constante (courbe b).

Q7. Représenter sur le document réponse DR2 les caractéristiques $p_{PV}(V_{PV})$:

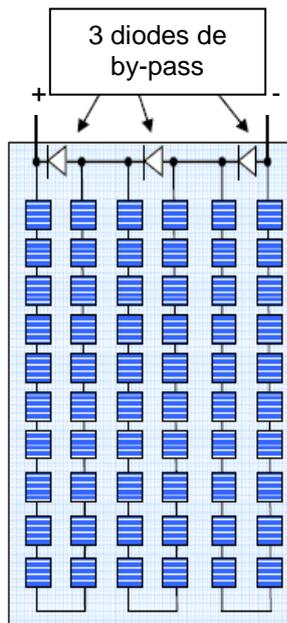
- Courbes c lorsque l'irradiation solaire est à 1000W/m^2 (courbe c1) puis diminue de 50% (courbe c2) pour une température de 25°C
- Courbes d lorsque la température est de 25°C (courbe d1) puis de 70°C (courbe d2) à irradiation constante de 1000W/m^2 .

Les panneaux photovoltaïques sont connectés à 2 onduleurs SunEzy 600E dont la documentation est donnée en annexe 2. Chacun de ces onduleurs possède 3 entrées MPPT indépendantes. L'onduleur peut fonctionner avec au moins une de ses entrées MPPT utilisée.

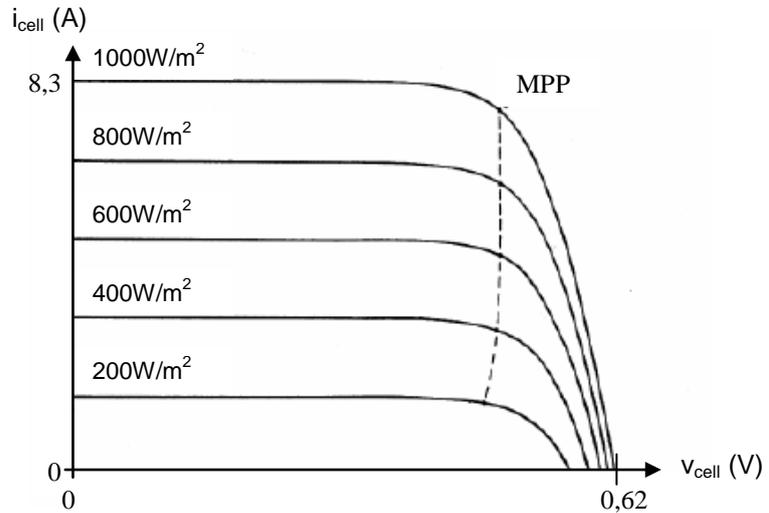
Q8. Quels sont les intérêts de disposer de plusieurs entrées MPPT ?

Q9. Proposer différentes connexions possibles, série, parallèle, des panneaux photovoltaïques et des onduleurs pour connecter les 36 modules aux 2 onduleurs. Sélectionner la meilleure configuration en justifiant votre choix.

A-2 Influence des ombrages sur les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque



Etude de la structure d'un panneau photovoltaïque dont la structure est donné ci-dessous :



(a)

(b)

Figure 3 : Schéma de connexion d'un module 60 cellules (a) et caractéristiques d'une cellule pour différents éclairements (b)

Q10. Dans le module photovoltaïque présenté Figure 3, une diode de type Schottky est placée en antiparallèle toutes les 20 cellules. Quel est son rôle ? Pourquoi est-ce une diode de type Schottky ?

Lors du fonctionnement du panneau photovoltaïque une cellule peut être masquée partiellement ou totalement par des salissures ou des ombrages. Considérons le cas représenté ci-contre pour lequel la cellule grisée est partiellement masquée laissant passer une irradiation de 400W/m^2 pour une irradiation de 1000W/m^2 sur le reste du panneau

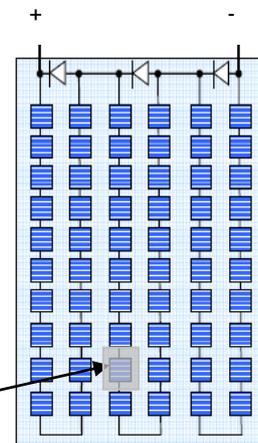


Figure 4 : Panneau dont une cellule est partiellement masquée. La cellule ombrée est grisée.

Q11. Donner les caractéristiques de ce panneau U_{oc} , I_{cc} , U_{mpp} , I_{mpp} , P_{max} dans les conditions standard de test et sans ombrage. Reporter ces valeurs sur la caractéristique $i_{PV}(v_{PV})$ de DR3.

Q12. Représenter sur le document réponse DR3 l'allure de la caractéristique $i_{PV}(v_{PV})$ de ce panneau lorsque la cellule est ombrée.

Q13. Représenter sur le document réponse DR3 l'allure de la caractéristique $p_{PV}(v_{PV})$ de ce panneau lorsque la cellule est ombrée.

L'équation simplifiée reliant le courant i_{cell} délivré par une cellule photovoltaïque à la tension à ses bornes est donnée ci-dessous :

$$i_{cell} = I_{cc} - I_0 \left[e^{\frac{V_{cell}}{\alpha}} - 1 \right]$$

avec :

I_{cc} : courant de court circuit de la cellule. Fonction de l'éclairement. On prendra $I_{cc}=8,3A$ pour un éclairement de $1000W/m^2$ et on considèrera I_{cc} proportionnel à l'éclairement.

V_{cell} : tension aux bornes de la cellule.

I_0 : courant de saturation.

$\alpha = \frac{K.T}{q}$ où K est la constante de Boltzman ($1,381 \times 10^{-23} J.K^{-1}$), T la température de la cellule PV (en K) et q la charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19} C$)

Dans la suite nous allons étudier le fonctionnement particulier des cellules placées dans la branche présentant un ombrage lorsque celles-ci sont court-circuitées par la diode de by-pass. On considèrera que la tension aux bornes de cette diode est nulle.

Q14. Déterminer I_0 pour obtenir une tension à vide de la cellule de 0,62V pour un éclairement de $1000W/m^2$ et une température de cellule de $25^\circ C$.

Q15. Pour une température de $25^\circ C$ et un éclairement de $1000W/m^2$ sur les cellules non ombrées et en considérant la branche du panneau photovoltaïque constituée des 20 cellules dont celle ombrée à 60% (Figure 4) rechercher le point de fonctionnement $i_{cellombre}$, $V_{cellombre}$ de la cellule ombrée et i_{cell} , V_{cell} des 19 autres lorsque la diode de by-pass court-circuite cette branche. Reporter ces valeurs dans le tableau de DR4.

Q16. Montrer que la cellule ombrée devient réceptrice. Calculer la puissance $P_{cellombre}$ qu'elle absorbe. Commenter cette valeur de puissance. Calculer la puissance P_{cell} fournie pour les autres cellules. Reporter ces valeurs dans le tableau de DR4.

Q17. La tension de claquage inverse d'une cellule photovoltaïque cristalline est de l'ordre de 15 à 30V. Connaissant cette tension de claquage, justifier le nombre de cellules qui ont été placées en série, en parallèle avec la diode de by-pass.

B- ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le schéma de l'onduleur photovoltaïque est représenté Figure 5. Il est constitué de 2 étages. Le premier étage dispose de 3 entrées MPPT (Maximum Power Point Tracking) sur lesquelles sont raccordés les champs photovoltaïques. Le second étage est un onduleur à point milieu alimenté par un bus continu de tension E_C . Cet onduleur de tension produit une onde de sortie synchronisée sur le réseau 230V-50 Hz sur lequel il est raccordé.

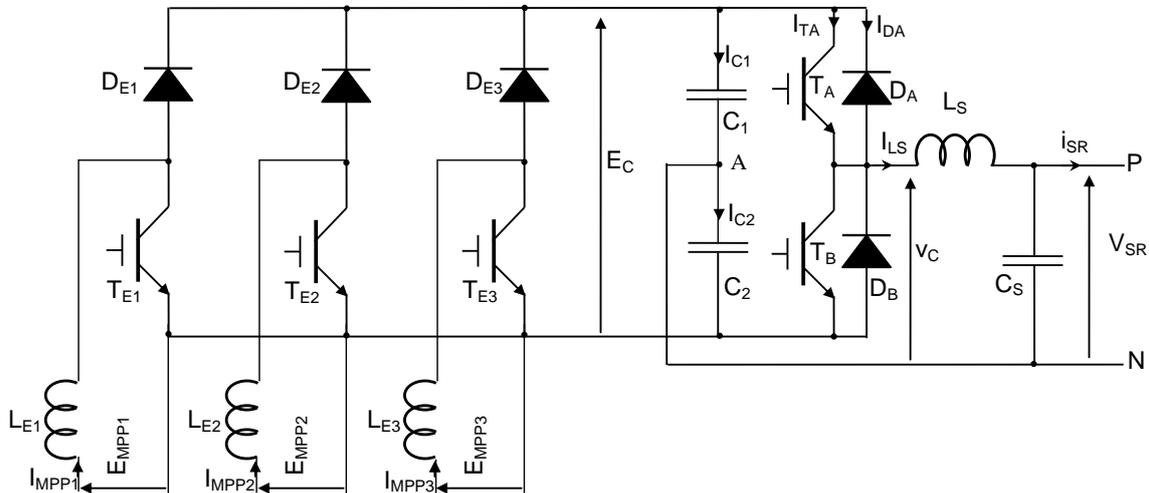


Figure 5 : Schéma simplifié global de l'onduleur photovoltaïque

Les caractéristiques de cet onduleur photovoltaïque sont les suivantes :

Entrées MPPT :

$$200V < E_{MPP} < 700V$$

$$I_{MPPMax} = 8,5A \text{ par entrée}$$

Sortie :

$$V_{SR} = 230V \text{ efficace}$$

$$F_R = 50Hz, \omega = 2\pi F_R$$

$$P_{SRnom} = 5kW$$

Facteur de puissance unitaire en sortie

Fréquence de travail des interrupteurs : $F_{D0} = 20kHz$

Les rapports cycliques des commandes des interrupteurs T_{E1} à T_{E3} dépendent des niveaux de tension E_{MPP1} à E_{MPP3} fournis par les champs photovoltaïques qui sont connectés à leurs entrées et sont appelés α_{MPP1} à α_{MPP3} .

Les interrupteurs T_A et T_B sont commandés de façons complémentaires par une commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). L'interrupteur T_A est commandé lorsque la modulante $m(\omega t) = \hat{m} \cdot \sin(\omega t)$ est supérieure au signal triangulaire $\text{trig}(\omega t)$. L'interrupteur T_B est commandé en opposition. La modulante est un signal sinusoïdal 50Hz en phase avec le courant i_{SR} (Voir document réponse DR5).

On appellera le temps de conduction de T_A : $\beta \cdot T_{D0}$ avec $T_{D0} = 1/F_{D0}$ période de découpage de l'onduleur. T_B est commandé pendant $(1-\beta) \cdot T_{D0}$.

La profondeur de modulation r sera définie comme étant le rapport entre l'amplitude de la modulante $m(\omega t)$ et l'amplitude du signal triangulaire $\text{trig}(\omega t)$.

Nota : Sur le document réponse DR5, le signal triangulaire est représenté à 500Hz afin de faciliter les tracés. En réalité ce signal devrait être à 20kHz.

B-1 Dimensionnement de l'étage onduleur

On considèrera que dans un premier temps :

- Les capacités C_1 et C_2 sont suffisamment importantes pour garantir une tension E_C constante.
- Les effets du filtre de sortie L_S , C_S sont négligés de sorte que $i_{LS} = i_{SR}$ et $v_C = v_{SR}$.

Q18. Représenter sur le document DR5 l'allure de la tension $v_C(\omega t)$ en fonction de E_C , $m(\omega t)$ et $\text{trig}(\omega t)$.

Q19. Déterminer la loi de variation de $\beta(\omega t)$. En déduire la loi de variation de $\langle v_C(\omega t) \rangle$ en fonction de $\beta(\omega t)$, r et E_C . Où $\langle v_C(\omega t) \rangle$ est la valeur moyenne de $v_C(\omega t)$ sur une période de découpage T_{D0} en faisant l'hypothèse que $F_{D0} \gg F_R$.

Q20. En déduire la valeur minimale que doit prendre la tension E_C pour remplir le cahier des charges.

On fixera dans la suite $E_C = 800V$.

Q21. Quelle est dans ces conditions la profondeur de modulation r lorsque l'onduleur est connecté sur un réseau 230V-50Hz ?

Q22. Tracer sur le document réponse DR6 l'allure du courant i_{TA} dans l'IGBT T_A et i_{DA} dans la diode D_A correspondant au courant i_{SR} donné dans le document réponse DR6.

Q23. Montrer que :

$$\langle i_{TA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left(\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{TA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi}}$$

$$\langle i_{DA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left(-\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{DA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi}}$$

Calculer les valeurs moyennes et efficaces des courants i_{TA} et i_{DA} pour un débit de puissance nominale dans un réseau 230V-50Hz.

Q24. Donner les contraintes sur les interrupteurs de l'onduleur, les reporter dans le tableau du document réponse DR7.

Q25. Tracer sur le document réponse DR8 l'allure du courant i_{C1} et i_{C2} dans les condensateurs C_1 et C_2 .

Q26. Déterminer la valeur des capacités C_1 et C_2 pour que la variation du potentiel au point A soit inférieure ou égale à 5% de $\frac{E_C}{2}$ quel que soit le débit dans le réseau compris entre 0 et 100% de la puissance nominale.

Q27. En considérant que la tension réseau v_{SR} est sinusoïdale et que la tension E_C est constante, déterminer l'expression de l'ondulation du courant I_{LS} dans l'inductance du filtre de sortie en fonction de β , F_{D0} , E_C , et L_S .

Q28. Déterminer la valeur de L_S pour que, lors d'un débit à puissance nominale dans un réseau 230V-50Hz, l'ondulation de courant dans cette inductance ne dépasse pas 5% du courant crête.

Q29. La ligne sur laquelle est raccordé l'onduleur est considérée comme étant une impédance constituée d'une résistance négligeable en série avec une inductance $L_r=3\mu\text{H}$ (longueur supposée de 10m) chargée par un réseau de puissance infinie 50Hz. Donner la fonction de transfert $\left| \frac{I_{SR}}{V_C} \right|$.

Déterminer la valeur de la capacité C_S afin que la fréquence résonance de ce filtre soit une décade en dessous de la fréquence de découpage.

B-2 Estimation des pertes de l'onduleur

Les composants utilisés pour réaliser le bras de l'onduleur sont des IGBT IHW40T120 de INFINEON incluant la diode antiparallèle.

Afin de calculer les pertes en conduction nous considérerons les modèles suivants :

$$V_{CE\text{sat}} = V_{CE0} + r_{Tt} \cdot i_C \quad \text{pour les IGBT}$$

$$V_F = V_0 + r_{Td} \cdot i_D \quad \text{pour les diodes}$$

Les valeurs permettant d'alimenter ce modèle seront trouvées dans l'extrait de la documentation des IGBT INFINEON IHW40T120 en annexe 3. On considérera que la température de jonction est de 150°C et que les IGBT sont commandés par une tension V_{GE} variant entre 0 et 15V.

Q30. Calculer les pertes par conduction des diodes et des IGBT pour le point de fonctionnement nominal. Reporter ces résultats dans le tableau du document DR7.

Les pertes en commutation seront évaluées pour l'ensemble IGBT+Diode à l'aide des figures 13 à 16 de la documentation.

Q31. Vérifier que E_{COM} est proportionnel à V_{CE} . Donner la valeur du coefficient de proportionnalité $k_{E/V}$. Vérifier que dans la plage de courant I_C compris entre 10 et 40A la somme des énergies de commutation $E_{COM} = E_{ON} + E_{OFF}$ peut être considérée comme proportionnelle à I_C . Donner la valeur du coefficient de proportionnalité $k_{E/I}$ pour $V_{CE} = 600\text{V}$.

Q32. Montrer que dans le cas particulier du fonctionnement en onduleur à MLI, lorsque le courant commuté est variable dans le temps mais périodique, la somme des énergies de commutation mises en jeu dans un interrupteur durant une période basse fréquence est proportionnelle à la valeur moyenne du courant commuté par cet interrupteur.

Q33. Evaluer les pertes par commutation d'un ensemble IGBT+Diode pour le point de fonctionnement nominal. Reporter cette valeur dans le tableau du document DR7.

Q34. Evaluer les pertes totales (hors filtre) pour le point de fonctionnement nominal. Evaluer le rendement de l'onduleur (hors filtre).

B-3 Dimensionnement et estimation des pertes de l'étage MPPT

On considérera que :

- Les capacités C_1 et C_2 sont suffisamment importantes pour garantir une tension E_C constante.
- Les tensions E_{MPP1} à E_{MPP3} sur les entrées MPPT sont constantes à l'échelle de la fréquence de découpage F_{Do} .

Les 3 entrées MPPT sont connectées à un champ photovoltaïque et se partagent 1/3 de la puissance lorsqu'elles fonctionnent au point nominal.

On rappelle que :

$$200\text{V} < E_{MPP} < 700\text{V}$$

$$I_{MPP\text{Max}} = 8,5\text{A par entrée}$$

On appellera α_{MPPi} (i représentant la i ème entrée MPPT) le rapport cyclique de commande de l'interrupteur T_{Ei} de sorte que l'interrupteur T_{Ei} est commandé périodiquement de $t = 0$ à $t = \alpha_{MPPi} T_{Do}$.

Q35. Déterminer la valeur des inductances L_{Ei} pour que l'ondulation crête à crête Δi_{MPPi} des courants I_{MPPi} reste toujours inférieure à 1A quelles que soient les valeurs des tensions E_{MPPi} (i variant de 1 à 3). Pour cela donner la relation liant L_{Ei} à E_{MPPi} , Δi_{MPPi} , E_c et F_{Do} . Indiquer la valeur de E_{MPPi} la plus contraignante et calculer L_{Ei} .

Dans la suite, nous allons évaluer le fonctionnement au point nominal de l'onduleur photovoltaïque aussi, pour prendre en compte ses pertes, nous allons considérer que la puissance d'entrée est de 5400W soit 1800W par entrée MPPT. D'autre part, la tension d'entrée E_{MPPi} sera arbitrairement placée au centre de la plage de tension autorisée soit $E_{MPPi} = 450V$.

Q36. Pour ce point de fonctionnement, déterminer le courant moyen $\langle I_{MPPi} \rangle$, l'ondulation de courant Δi_{MPPi} et le rapport cyclique α_{MPPi} . Vérifier que le hacheur fonctionne en conduction continue. Reporter ces valeurs dans le document réponse DR9. Représenter l'allure des courants $i_{TEi}(t)$ dans l'IGBT T_{Ei} et $i_{DEi}(t)$ dans la diode D_{Ei} sur le document réponse DR9.

Q37. En déduire les valeurs moyennes et efficaces des courants $i_{TEi}(t)$ et $i_{DEi}(t)$.

On reprendra pour les IGBT et les diodes les mêmes modèles que ceux présentés dans la partie B-2 sachant que pour les composants constituant cet étage :

$$V_{CE0} = 1V, r_{Tt} = 100m\Omega, V_{D0} = 0,9V, r_{Td} = 50m\Omega$$

Par la même technique que celle utilisée dans la partie B-2, l'énergie de commutation d'une cellule IGBT-Diode a été évaluée à 2mJ par période à ce point de fonctionnement.

Q38. Calculer les pertes par conduction et par commutation des IGBT et des diodes de cet étage. Donner les contraintes en tension s'appliquant sur ces interrupteurs.

Les inductances L_{Ei} ont été caractérisées en petits signaux sur un pont d'impédance. Cette mesure a donné une impédance dont la partie réelle vaut en continu $R_{DC} = 60m\Omega$ et à 20kHz et au delà, $R_{AC} = 200m\Omega$.

Q39. Calculer les pertes dans les inductances L_{Ei} .

Q40. En reprenant les résultats de la partie B-2 calculer les pertes totales et le rendement de cet onduleur photovoltaïque.

C- PACK BATTERIE ET BMS

La batterie utilisée dans le cadre de ce projet utilise des éléments LiFePO₄ (Lithium fer phosphate). Ces éléments présentent une très bonne densité d'énergie volumique et massique. De plus, ils supportent un grand nombre de cycles de charge et décharge (environ 2000 cycles) en fonctionnement normal pour une profondeur de décharge de 80%. En revanche, ces éléments voient leur durée de vie se dégrader très rapidement si on les décharge trop profondément ou si on les surcharge. Aussi on associera toujours à une batterie un circuit, appelé BMS (Battery Management System), qui aura pour fonction de contrôler l'état de charge des éléments. Une batterie est en général réalisée par la mise en série et en parallèle de plusieurs éléments. Les caractéristiques des éléments utilisés dans la batterie sont données Figure 6 et Annexe 4.

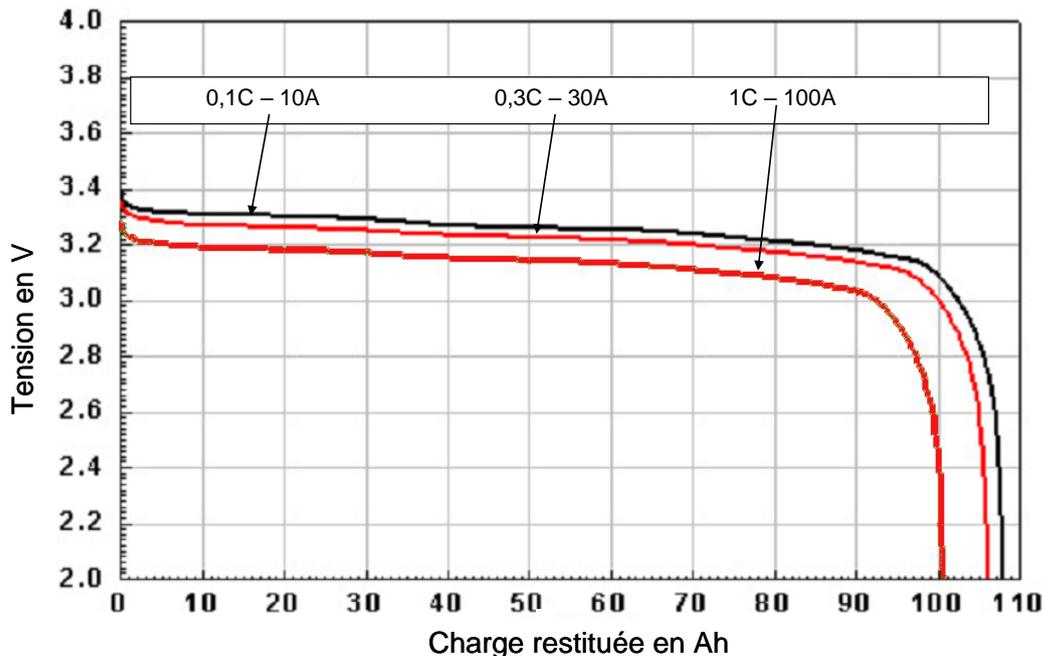


Figure 6 : Caractéristique tension/charge d'un élément LiFePO₄.

Q41. Quelle est la capacité en Ah de l'élément dont la caractéristique est présentée Figure 6 ? Combien d'éléments N_e de ce type va-t-il falloir utiliser pour réaliser une batterie de 5kWh ? Comment seront-ils connectés pour obtenir une tension nominale de 24V environ ?

La recharge d'un élément LiFePO₄ se fait en deux temps :

- une charge rapide à un courant de environ 0,3C à 1C (C étant la capacité de la batterie (Ah), 1C signifiant un courant de C ampères). Cette charge rapide est interrompue lorsque la tension aux bornes de la cellule est de 3,5V (charge à 80% environ. Voir annexe 4).
- une charge normale à tension constante durant laquelle la tension est maintenue à 3,5V. Cette charge est interrompue lorsque le courant de charge atteint 0,05C.

Pour réaliser une batterie, on aura en général recours à la mise en série et en parallèle de plusieurs éléments. La tension de seuil pour le passage de la charge rapide à la normale sera donc $3,5N_e$ (où N_e est le nombre d'éléments constituant la batterie). Les éléments LiFePO₄ étant très sensibles aux surcharges et aux décharges, il sera nécessaire de les surveiller individuellement et d'optimiser leur charge. Pour cela un BMS complète le chargeur. Il va avoir pour fonction d'assurer la protection des éléments en surveillant individuellement leur état de charge.

Dans cette partie, nous allons tout d'abord étudier le principe de fonctionnement d'un BMS dissipatif puis nous aborderons le principe et les avantages d'un BMS actif.

Le schéma de principe du BMS dissipatif est présenté Figure 7. Lors de la phase de charge normale, toutes les tensions sur les éléments sont surveillées. Dès qu'une de ces tensions devient supérieure à 3,65V le MOSFET en parallèle avec l'élément en question est rendu conducteur déviant ainsi une partie du courant de charge. Si malgré tout la tension d'un des éléments venait à atteindre 3,9V alors le courant de charge serait interrompu et les MOSFET gardés passants jusqu'à ce que les tensions sur ces éléments soient redescendues en dessous de 3,7V. On reprend alors le cycle de charge à tension constante.

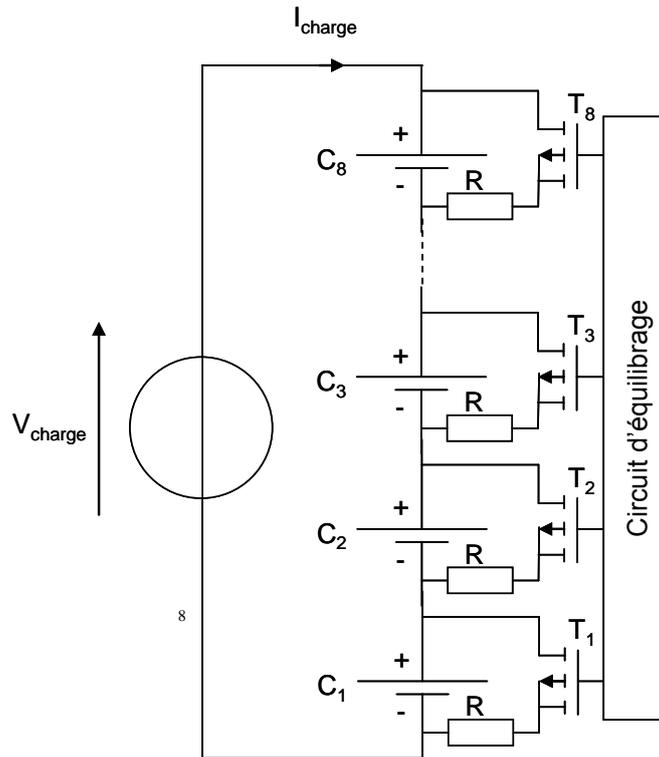


Figure 7 : Schéma de principe d'un BMS dissipatif assurant la protection d'un bras de 8 cellules LiFePO4.

Q42. En vous aidant de la caractéristique de charge présentée en Annexe 4 déterminer, dans sa zone linéaire (State Of Charge entre 10 et 90%) la capacité C_{eq} en Farad de cet élément.

Q43. Les éléments C_1 à C_8 de la Figure 7 présentent une capacité équivalente nominale C_{eq} égale à celle déterminée question Q42 et sont chargés par un courant $I_{charge} = 30A$. Sachant que les capacités C_{eq} des éléments sont données par le constructeur avec une précision de $\pm 5\%$ et en vous plaçant dans le cas le plus défavorable, déterminer quelle valeur doit prendre la résistance d'équilibrage R pour que ce circuit soit efficace (tous les éléments arrivent à 100% de charge en même temps).

Q44. Quelle est la puissance dissipée dans R . Quelle est l'énergie perdue durant la charge en considérant que 1 élément parmi les N_e que comporte le pack batterie présente une capacité équivalente de 95% de la valeur nominale et que tous les autres ont une capacité équivalente de 105% de la capacité nominale ?

Q45. Lors de la décharge d'un bras de la batterie, afin de protéger les éléments, le BMS va couper le courant dès qu'un des éléments verra sa tension arriver à 2,5V. Quelle énergie aura-t-on pu récupérer si l'on considère les caractéristiques des éléments similaires à celles de la question Q44 ?

Afin d'améliorer le rendement lors de la charge et de permettre une meilleure utilisation de l'énergie stockée dans les batteries, une deuxième famille de BMS existe. Le principe est de soutenir les éléments les plus faibles lors de la charge et de la décharge en permettant un transfert d'énergie d'un élément trop chargé vers un deuxième sous chargé grâce à une électronique adaptée. Une structure permettant le transfert de n'importe quel élément vers n'importe quel autre est présentée Figure 8. La capacité C_0 est un condensateur de forte valeur dont la tension est considérée constante à l'échelle de la période de découpage.

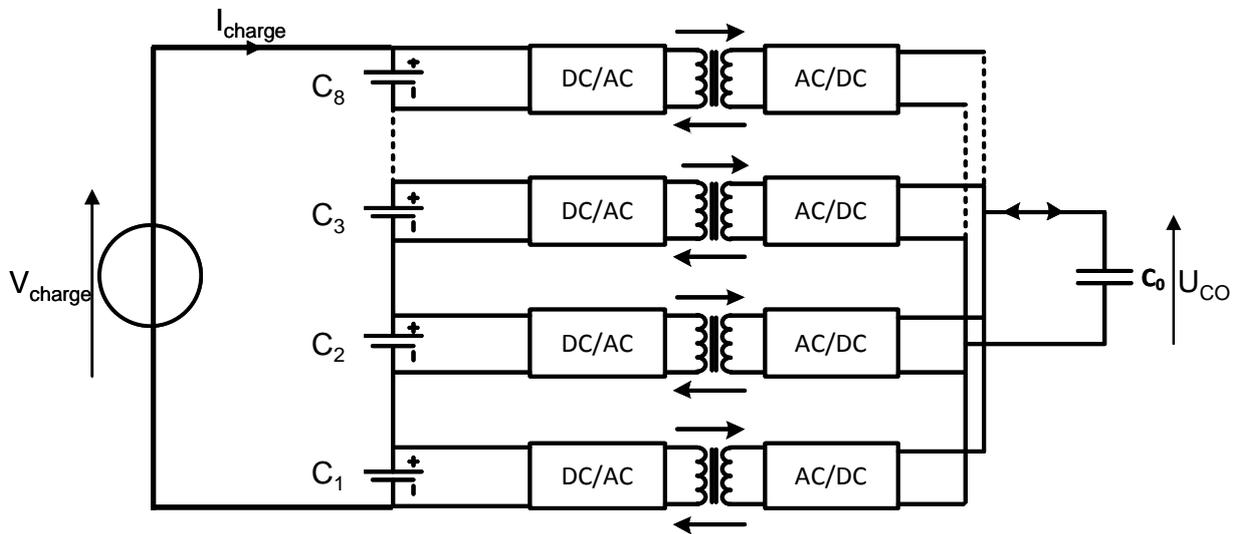


Figure 8 : Schéma de principe d'un BMS actif.

Q46. Chaque convertisseur reliant un élément au condensateur C_0 peut être considéré comme étant équivalent à un transformateur de rapport de transformation unitaire en série avec une résistance R_s de faible valeur (Figure 9). Montrer que la tension U_{C_0} aux bornes de la capacité C_0 est égale à la moyenne des tensions U_{C_i} (i variant de 1 à N) aux bornes des N éléments.

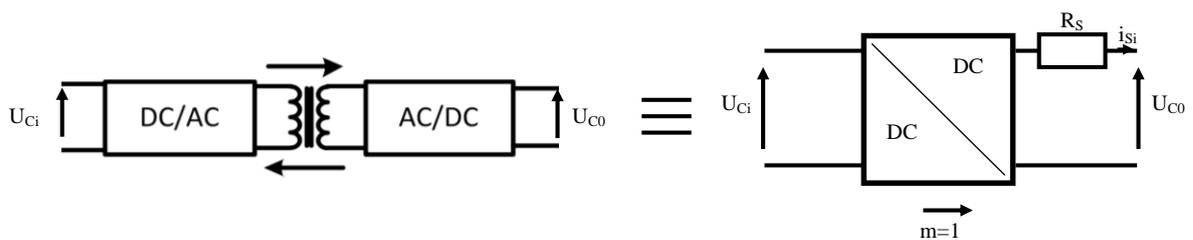


Figure 9 : Schéma équivalent des convertisseurs.

Q47. Déterminer l'expression de la puissance échangée entre l'élément i (i variant de 1 à N) de la batterie et la capacité C_0 .

Q48. En étudiant le signe de cette puissance en fonction de U_{C_i} et U_{C_0} , montrer qu'un équilibrage a lieu entre les éléments C_i . Montrer que ce mode est désavantageux au niveau énergétique.

Q49. La dispersion dans les valeurs des capacités des éléments étant $\pm 5\%$, calculer les courants d'équilibrage I_{s_i} susceptibles de circuler au travers de ces convertisseurs lorsqu'un élément est à 95% de la capacité nominale et les autres à 105% et que l'on souhaite une même augmentation de tension sur tous les éléments et ce pour un courant de charge de $0,3C$. Faire l'application

numérique en considérant 8 éléments. Donner le courant dans le convertisseur associé à l'élément le plus faible et le courant dans chacun des 7 autres éléments.

Q50. Ce fonctionnement est-il possible lors de la phase de décharge de la batterie ? Quelle est alors l'énergie qui est théoriquement récupérable si la dispersion entre les éléments est la même que dans la question Q50 ? Qu'en est-il si on considère que le rendement des convertisseurs d'équilibrage est de 90% ?

D- CONVERTISSEUR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB)

Afin d'accélérer l'équilibrage, on préférera agir sur le rapport m du transformateur électronique pour régler le transfert de puissance. C'est ce mode de fonctionnement du transformateur électronique qui va être étudié dans la partie D. Cette structure de transformateur électronique est aussi appelée Dual Active Bridge

La structure du convertisseur est présentée Figure 10. Ce convertisseur est constitué d'un étage onduleur, d'un transformateur et d'un étage redresseur commandé. Le réglage du transfert de l'énergie entre la source et la charge est effectué par réglage du décalage δT_d entre les commandes de l'onduleur et celles du redresseur où T_d est la période de découpage. Dans cette étude, ce convertisseur va permettre de réaliser la fonction BMS actif en assurant le transfert d'énergie entre deux cellules de la batterie. Les tensions V_e et V_s sont donc des tensions de cellules LiFePO4 et seront considérées constantes, dans la suite, à l'échelle de la période de découpage.

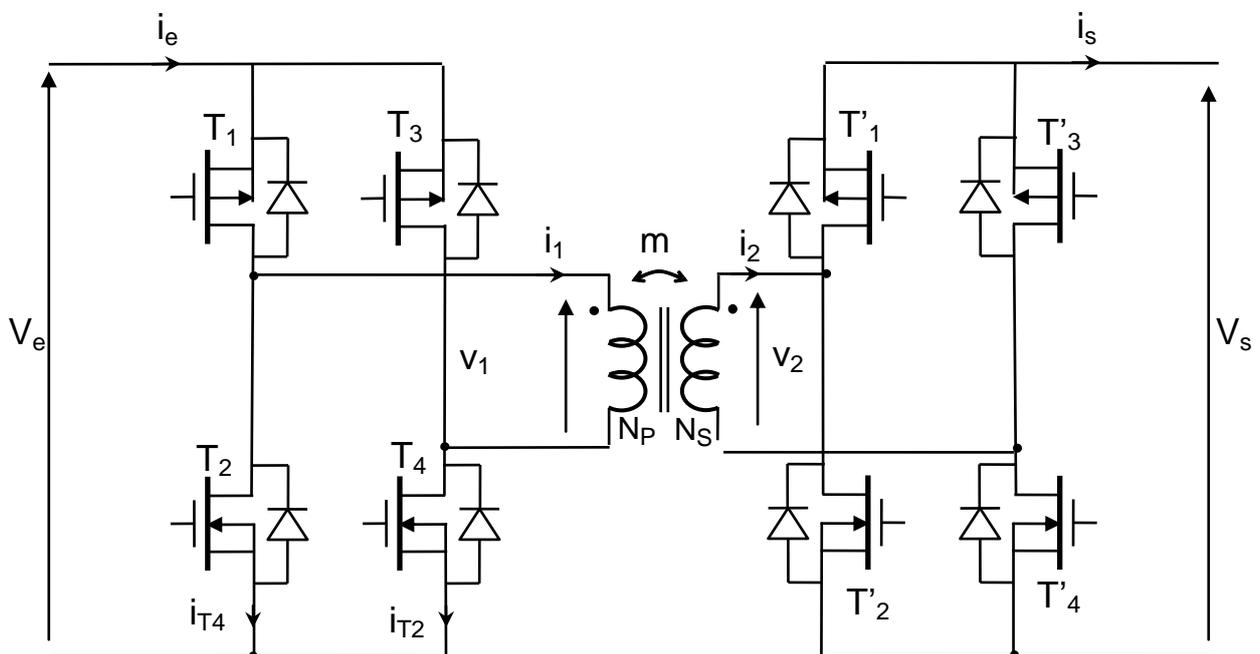


Figure 10 : Structure Dual Active Bridge

Les rapports cycliques des commandes des bras de l'onduleur et du redresseur sont de 0,5 et les commandes sont complémentaires pour les deux bras de sorte que :

- Dans l'onduleur :

- de $t = 0$ à $t = T_d/2$ T_1 et T_4 sont commandés et T_2 et T_3 bloqués
- de $t = T_d/2$ à $t = T_d$ T_2 et T_3 sont commandés et T_1 et T_4 bloqués

- Dans le redresseur :

- de $t = \delta T_d$ à $t = T_d/2 + \delta T_d$ T'_1 et T'_4 sont commandés et T'_2 et T'_3 bloqués
 - de $t = T_d/2 + \delta T_d$ à $t = T_d + \delta T_d$ T'_2 et T'_3 sont commandés et T'_1 et T'_4 bloqués
- δT_d pouvant varier de $-T_d/2$ à $T_d/2$.

Le schéma équivalent du transformateur qui va être utilisé dans la suite du problème est présenté Figure 11. Dans cette partie nous négligerons dans un premier temps l'inductance magnétisante en considérant qu'elle est grande devant les autres impédances du montage.

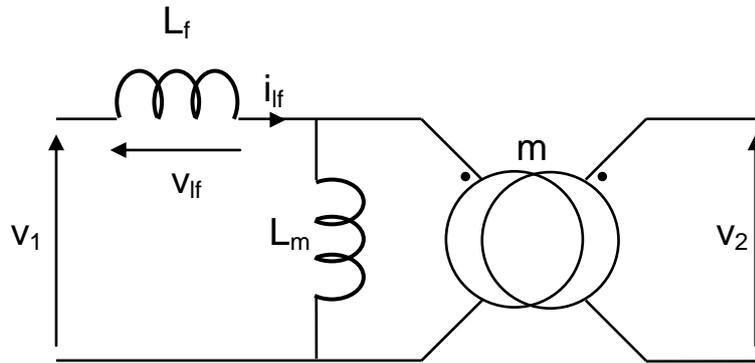


Figure 11 : Schéma équivalent du transformateur

Q51. En considérant $V_e > V_s$, $m=1$ et $\delta = 0,1$, représenter sur le document réponse DR10 l'allure des tensions $v_1(t)$ et $v_2(t)$ ainsi que de la tension $v_{lf}(t)$ présente sur l'inductance de fuite. En déduire l'allure du courant $i_{lf}(t)$ traversant cette inductance et le représenter sur le document réponse DR10.

Q52. Donner en fonction de L_f , V_1 , V_2 , m , δ et T_d les expressions de $i_{lf}(t)$ pour les 4 intervalles $0 < t < \delta T_d$, $\delta T_d < t < T_d/2$, $T_d/2 < t < T_d/2 + \delta T_d$ et $T_d/2 + \delta T_d < t < T_d$. Aux instants t_{trans} des transitions entre les différents intervalles, on appellera le courant circulant dans l'inductance de fuite $i_{lf}(t_{trans})$ avec t_{trans} pouvant prendre les valeurs 0 , δT_d , $T_d/2$, $T_d/2 + \delta T_d$, T_d . Donner les expressions de $i_{lf}(t_{trans})$ pour $t = \delta T_d$, $T_d/2$, $T_d/2 + \delta T_d$ et T_d en fonction de $i_{lf}(0)$.

Q53. Compte tenu des symétries dans ce montage, que peut-on dire de la valeur moyenne du courant $i_{lf}(t)$? En déduire l'expression de $i_{lf}(0)$.

Q54. Tracer sur le document réponse DR11 l'allure des courants d'entrée $i_e(t)$ et de sortie $i_s(t)$ du convertisseur DAB.

Q55. Donner les expressions des valeurs moyennes $\langle i_e \rangle$ et $\langle i_s \rangle$ de ces courants en fonction de L_f , V_e , V_s , T_d , m et δ . Vérifier leurs valeurs relatives et justifier cette relation.

Q56. Déduire de la question précédente la puissance moyenne $\langle p_{DAB} \rangle$ transmise par ce convertisseur de V_e vers V_s en fonction de L_f , V_e , V_s , T_d , m et δ . Montrer qu'il existe un maximum P_{DABmax} à cette puissance $\langle p_{DAB} \rangle$ lorsque l'on fait varier δ , en déterminer l'expression et indiquer quel(s) élément(s) du circuit limite(nt) cette puissance.

Q57. Montrer que le convertisseur est réversible de sorte que la puissance peut transiter de V_e vers V_s ou de V_s vers V_e . Justifier la réponse.

Les tensions V_e et V_s sont les tensions des cellules $LiFePO_4$ placées en entrée et en sortie et peuvent varier entre 2,4V et 4,2V selon l'état de charge. Le convertisseur DAB va servir ici de circuit d'équilibrage de charge et on souhaite permettre un courant d'équilibrage de 2A entre ces deux cellules. La fréquence de découpage F_d est fixée à 500kHz. Pour assurer une réversibilité symétrique on prendra $m=1$.

Q58. Déterminer la valeur maximale de l'inductance de fuite L_f qui va permettre ce courant d'équilibrage quels que soient les niveaux de tension de V_e et V_s compris dans la plage 2,4V à 4,2V. Il est rappelé que la fonction est ici un circuit d'équilibrage et que donc le transfert d'énergie ira toujours de la cellule la plus chargée vers celle la moins chargée.

Q59. On fixe $L_f=100nH$ et $m=1$. Déterminer pour le point de fonctionnement $V_e=V_s=3V$ et $\langle i_e \rangle=2A$ les valeurs des courants efficaces au primaire et au secondaire dans le transformateur.

Fin du problème