Analyse des trajectoires d'équilibre d'un convertisseur pour réseau mixte AC/DC maillé

Lukas CAFRAN[1], Jean-François TRÉGOUËT[1], Tanguy SIMON[2], Jean-Yves GAUTHIER[1], Xuefang LIN-SHI[1], Roman LE GOFF LATIMIER[3], Hamid BEN AHMED[3], Gurvan JODIN[3]

1. Laboratoire Ampère, Lyon, France

2. Laboratoire LAGEPP, Lyon, France

3. SATIE, Ker Lann, France

31/05/2024

Sommaire

Introduction

Modélisation

Un ensemble de solution au problème

Conclusion & Perspectives

Sommaire

Introduction

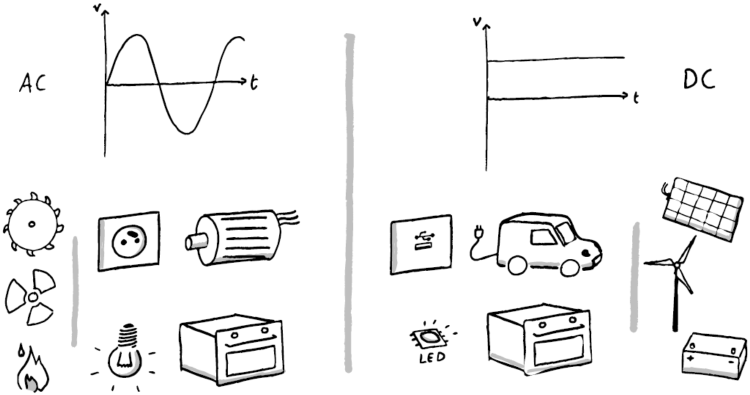
Modélisation

Un ensemble de solution au problème

Conclusion & Perspectives

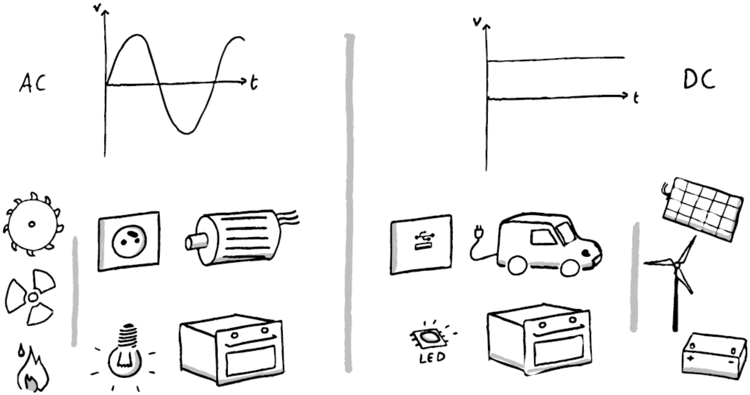
Vers les réseaux DC

- Introduction des énergies renouvelables
- Le DC est de plus en plus prisé au regard des charges et sources
- Interopérabilité entre les différentes générations de réseaux



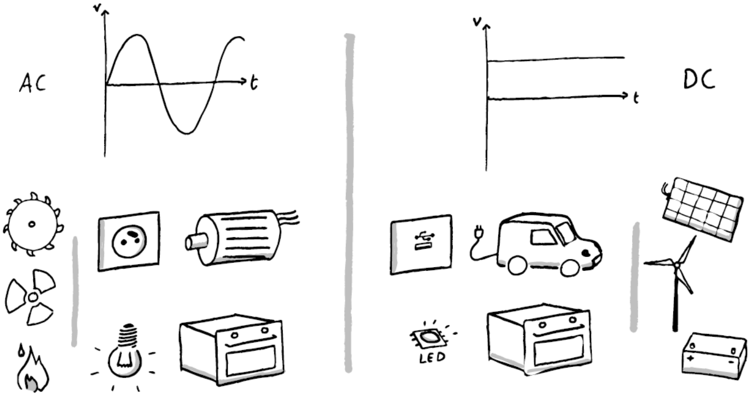
Vers les réseaux DC

- Introduction des énergies renouvelables
- Le DC est de plus en plus prisé au regard des charges et sources
- Interopérabilité entre les différentes générations de réseaux



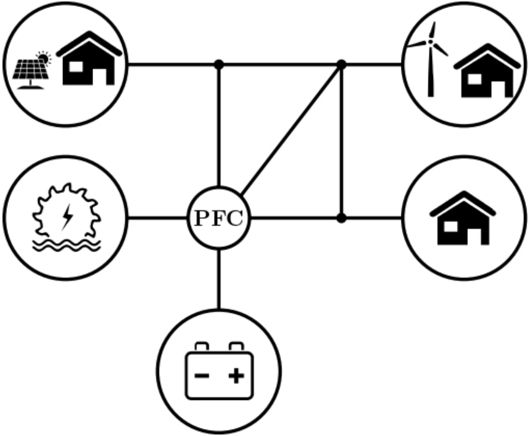
Vers les réseaux DC

- Introduction des énergies renouvelables
- Le DC est de plus en plus prisé au regard des charges et sources
- Interopérabilité entre les différentes générations de réseaux



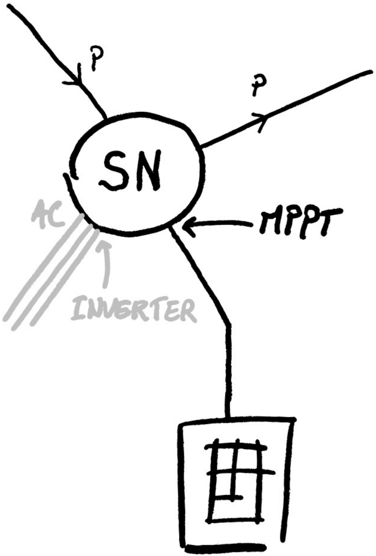
Vers les réseaux maillés

Le maillage des réseaux offre plus de résilience et de flexibilité



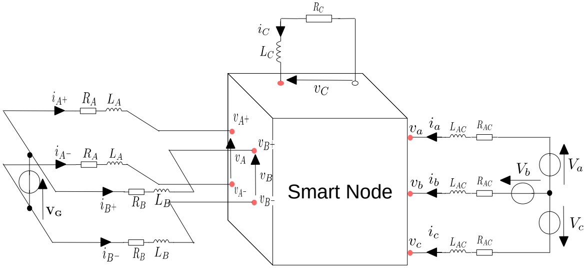
Des noeuds intelligents

Des noeuds intelligents (smart node, SN) pour gérer les flux et les contraintes sur le réseau

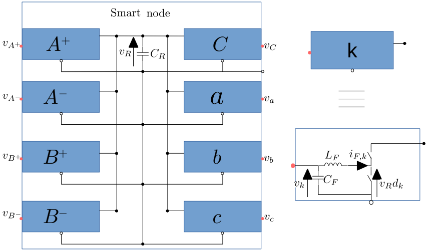


* MMPT : une fonctionnalité envisagée pour le SN

Un cas d'étude simplifié



(a) Le Smart Node dans le réseau mixte AC/DC



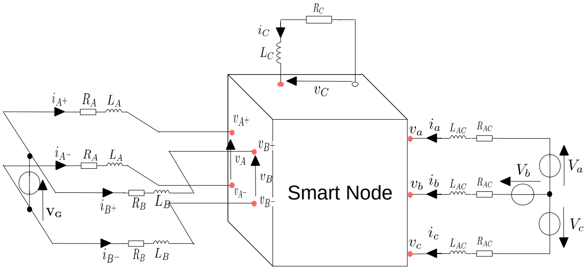
(b) Le Smart Node

Introduction

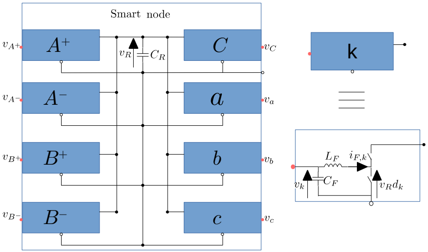
Modélisation

Un ensemble de solution au problème

Conclusion & Perspectives



(a) Le Smart Node dans le réseau mixte AC/DC



(b) Le Smart Node

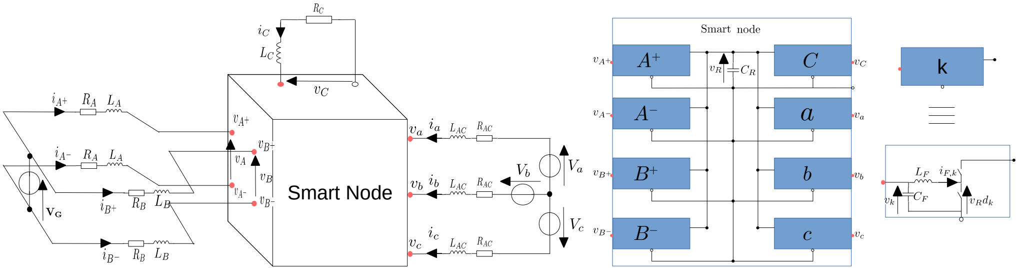
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t) \tag{1}$$

Les vecteurs $i_F(t) \in \mathbb{R}^8$ et $v(t) \in \mathbb{R}^8$ rassemblent les courants et les tensions des filtres LC du smart node et $i_G(t) = \begin{bmatrix} i_C(t) & i_{A^+}(t) & i_{A^-}(t) & i_{B^+}(t) & i_a(t) & i_b(t) \end{bmatrix}^\mathsf{T}$.

$$\mathbb{R}^{23} \ni x(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) & i_\mathrm{F}(t)^\mathsf{T} & v(t)^\mathsf{T} & i_\mathrm{G}(t)^\mathsf{T} \end{bmatrix}^\mathsf{T}$$

$$\mathbb{R}^{8} \ni u(t) = \begin{bmatrix} d_C(t) & d_{A^+}(t) & d_{A^-}(t) & d_{B^+}(t) & d_{B^-}(t) & d_a(t) & d_b(t) & d_c(t) \end{bmatrix}^\mathsf{T}$$

Modèle d'état dynamique



(a) Le Smart Node dans le réseau mixte AC/DC

(b) Le Smart Node

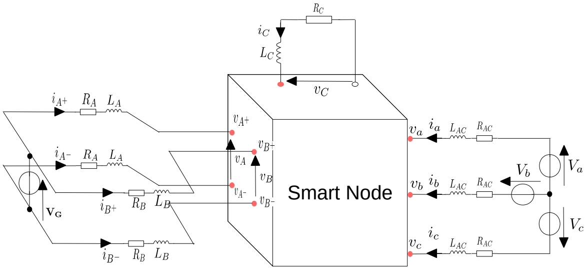
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t) \tag{1}$$

Les vecteurs $i_F(t) \in \mathbb{R}^8$ et $v(t) \in \mathbb{R}^8$ rassemblent les courants et les tensions des filtres LC du smart node et $i_G(t) = \begin{bmatrix} i_C(t) & i_{A^+}(t) & i_{A^-}(t) & i_{B^+}(t) & i_a(t) & i_b(t) \end{bmatrix}^\intercal$.

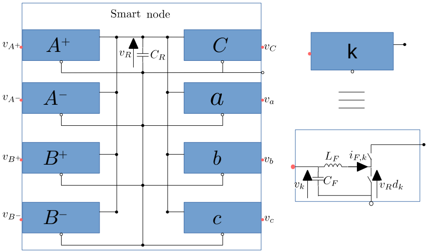
$$\mathbb{R}^{23} \ni x(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) & i_{\mathrm{F}}(t)^\intercal & v(t)^\intercal & i_{\mathrm{G}}(t)^\intercal \end{bmatrix}^\intercal$$

$$\mathbb{R}^{8} \ni u(t) = \begin{bmatrix} d_C(t) & d_{A^+}(t) & d_{A^-}(t) & d_{B^+}(t) & d_{B^-}(t) & d_a(t) & d_b(t) & d_c(t) \end{bmatrix}^\intercal$$

Modèle d'état dynamique



(a) Le Smart Node dans le réseau mixte AC/DC



(b) Le Smart Node

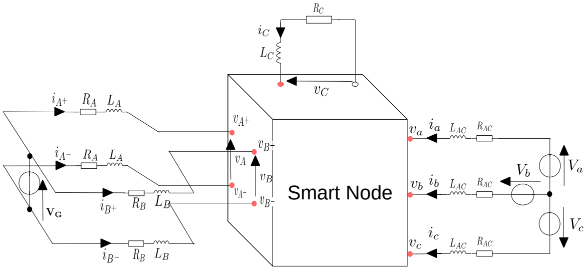
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t) \tag{1}$$

Les vecteurs $i_F(t) \in \mathbb{R}^8$ et $v(t) \in \mathbb{R}^8$ rassemblent les courants et les tensions des filtres LC du smart node et $i_G(t) = \left[i_C(t) \quad i_{A^+}(t) \quad i_{A^-}(t) \quad i_{B^+}(t) \quad i_a(t) \quad i_b(t) \right]^\intercal$.

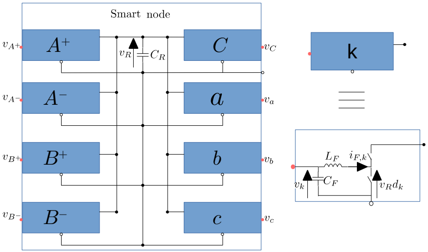
$$\mathbb{R}^{23} \ni x(t) = \left[\ v_R(t) \quad i_F(t)^\intercal \quad v(t)^\intercal \quad i_G(t)^\intercal\ \right]^\intercal$$

$$\mathbb{R}^{8} \ni u(t) = \left[\ d_C(t) \ \ d_{A^+}(t) \quad d_{A^-}(t) \quad d_{B^+}(t) \quad d_{B^-}(t) \quad d_a(t) \quad d_b(t) \quad d_c(t)\ \right]^\intercal$$

Modèle d'état dynamique



(a) Le Smart Node dans le réseau mixte AC/DC



(b) Le Smart Node

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t)$$

$$\mathbb{R}^{23} \ni x(t) = [\; v_R(t) \quad i_{\mathrm{F}}(t)^\intercal \quad v(t)^\intercal \quad i_{\mathrm{G}}(t)^\intercal \;]^\intercal$$

$$\mathbb{R}^{8} \ni u(t) = [\; d_C(t) \quad d_{A^+}(t) \quad d_{A^-}(t) \quad d_{B^+}(t) \quad d_{B^-}(t) \quad d_a(t) \quad d_b(t) \quad d_c(t) \;]^\intercal$$

$$\mathbb{R}^{8} \ni w(t) = [\, V_G \quad v_R^r \quad i_C^r \quad i_A^r \quad V_\alpha(t) \quad V_\beta(t) \quad i_\alpha^r(t) \quad i_\beta^r(t)]^\intercal$$

On modélise le système de tension AC équilibré dans le repère de Clarke.

Cahier des charges

$$\mathbb{R}^7 \ni e(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) - v_R^r & i_C(t) - i_C^r & i_{A^+}(t) - i_A^r \\ i_{A^+}(t) - i_{A^-}(t) & i_a(t) - i_\alpha^r(t) & i_b(t) + \frac{1}{2} i_\alpha^r(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^r(t) & \dot{i}_{B^+}(t) \end{bmatrix}^\intercal$$

- réguler le bus DC interne au SN (c.-à-d. la tension aux bornes du condensateur C_R) à une tension constante v_R^r ;
- fournir des courants : constant i_C^r à la charge, constant i_A^r par la ligne A, sinusoïdale $i_\alpha^r(t)$ et $i_\beta^r(t)$ pour la partie AC (on utilise ici la transformé de Clarke) ;
- imposer l'égalité entre les courants aller et retour dans chaque ligne, c.-à-d. $i_{A^-} = -i_{A^+}, i_{B^-} = -i_{B^+}$;
- assurer que le courant dans la ligne B est constant dans le temps à l'équilibre.

La référence sur i_{B^+} n'est pas explicitée car elle est physiquement imposée par le bilan de puissance au niveau du condensateur C_R.

Cahier des charges

$$\mathbb{R}^7 \ni e(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) - v_R^r & i_C(t) - i_C^r & i_{A^+}(t) - i_A^r \\ i_{A^+}(t) - i_{A^-}(t) & i_a(t) - i_\alpha^r(t) & i_b(t) + \frac{1}{2} i_\alpha^r(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^r(t) & \dot{i}_{B^+}(t) \end{bmatrix}^\top$$

- réguler le bus DC interne au SN (c.-à-d. la tension aux bornes du condensateur C_R) à une tension constante v_R^r ;
- fournir des courants : constant i_C^r à la charge, constant i_A^r par la ligne A, sinusoïdale $i_\alpha^r(t)$ et $i_\beta^r(t)$ pour la partie AC (on utilise ici la transformé de Clarke) ;
- imposer l'égalité entre les courants aller et retour dans chaque ligne, c.-à-d. $i_{A^-} = -i_{A^+}, i_{B^-} = -i_{B^+}$;
- assurer que le courant dans la ligne B est constant dans le temps à l'équilibre.

La référence sur i_{B^+} n'est pas explicitée car elle est physiquement imposée par le bilan de puissance au niveau du condensateur C_R.

Cahier des charges

$$\mathbb{R}^7 \ni e(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) - v_R^r & i_C(t) - i_C^r & i_{A^+}(t) - i_A^r \end{bmatrix}$$

$$i_{A^+}(t) - i_{A^-}(t) \quad i_a(t) - i_\alpha^r(t) \quad i_b(t) + \frac{1}{2} i_\alpha^r(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^r(t) \quad \dot{i}_{B^+}(t) \Big]^\mathsf{T}$$

- réguler le bus DC interne au SN (c.-à-d. la tension aux bornes du condensateur C_R) à une tension constante v_R^r ;
- fournir des courants : constant i_C^r à la charge, constant i_A^r par la ligne A, sinusoïdale $i_\alpha^r(t)$ et $i_\beta^r(t)$ pour la partie AC (on utilise ici la transformé de Clarke) ;
- imposer l'égalité entre les courants aller et retour dans chaque ligne, c.-à-d. $i_{A^-} = -i_{A^+}, i_{B^-} = -i_{B^+}$;
- assurer que le courant dans la ligne B est constant dans le temps à l'équilibre.

La référence sur i_{B^+} n'est pas explicitée car elle est physiquement imposée par le bilan de puissance au niveau du condensateur C_R.

Cahier des charges

$$\mathbb{R}^7 \ni e(t) = \begin{bmatrix} v_R(t) - v_R^r & i_C(t) - i_C^r & i_{A^+}(t) - i_A^r \\ & i_{A^+}(t) - i_{A^-}(t) & i_a(t) - i_\alpha^r(t) & i_b(t) + \frac{1}{2} i_\alpha^r(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^r(t) & i_{B^+}(t) \end{bmatrix}^\mathsf{T}$$

- réguler le bus DC interne au SN (c.-à-d. la tension aux bornes du condensateur C_R) à une tension constante v_R^r ;
- fournir des courants : constant i_C^r à la charge, constant i_A^r par la ligne A, sinusoïdale $i_\alpha^r(t)$ et $i_\beta^r(t)$ pour la partie AC (on utilise ici la transformé de Clarke) ;
- imposer l'égalité entre les courants aller et retour dans chaque ligne, c.-à-d. $i_{A^-} = -i_{A^+}, i_{B^-} = -i_{B^+}$;
- assurer que le courant dans la ligne B est constant dans le temps à l'équilibre.

La référence sur i_{B^+} n'est pas explicitée car elle est physiquement imposée par le bilan de puissance au niveau du condensateur C_R.

Bilan

- modèle bilinéaire
- régulation de sortie
- avec des perturbations et des consignes sinusoïdales

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t)$$
$$\dot{w}(t) = Sw(t)$$
$$e(t) = Cx(t) + Qw(t)$$

$$\mathbb{R}^8 \ni w(t) = \begin{bmatrix} V_{DC} & v_R^r & i_C^r & i_A^r & V_\alpha(t) & V_\beta(t) & i_\alpha^r(t) & i_\beta^r(t) \end{bmatrix}^\top$$

La matrice semi-simple S est tel que $\sigma(S) = \{\mathbf{0}_4^\top, i\omega, -i\omega, i\omega, -i\omega\} \subset i\mathbb{R}$.

Est-il possible de satisfaire le cahier des charges défini précédement avec le convertisseur choisi ?

Bilan

- modèle bilinéaire
- régulation de sortie
- avec des perturbations et des consignes sinusoïdales

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t)$$
$$\dot{w}(t) = Sw(t)$$
$$e(t) = Cx(t) + Qw(t)$$

$$\mathbb{R}^8 \ni w(t) = \begin{bmatrix} V_{DC} & v_R^r & i_C^r & i_A^r & V_\alpha(t) & V_\beta(t) & i_\alpha^r(t) & i_\beta^r(t) \end{bmatrix}^\top$$

La matrice semi-simple S est tel que $\sigma(S) = \{\mathbf{0}_4^\top, i\omega, -i\omega, i\omega, -i\omega\} \subset i\mathbb{R}$.

Est-il possible de satisfaire le cahier des charges défini précédement avec le convertisseur choisi ?

Bilan

- modèle bilinéaire
- régulation de sortie
- avec des perturbations et des consignes sinusoïdales

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t)$$
$$\dot{w}(t) = Sw(t)$$
$$e(t) = Cx(t) + Qw(t)$$

$$\mathbb{R}^8 \ni w(t) = \begin{bmatrix} V_{DC} & v_R^r & i_C^r & i_A^r & V_\alpha(t) & V_\beta(t) & i_\alpha^r(t) & i_\beta^r(t) \end{bmatrix}^\top$$

La matrice semi-simple S est tel que $\sigma(S) = \{\mathbf{0}_4^\top, i\omega, -i\omega, i\omega, -i\omega\} \subset i\mathbb{R}$.

Est-il possible de satisfaire le cahier des charges défini précédement avec le convertisseur choisi ?

Bilan

- modèle bilinéaire
- régulation de sortie
- avec des perturbations et des consignes sinusoïdales

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(x(t))u(t) + Pw(t)$$
$$\dot{w}(t) = Sw(t)$$
$$e(t) = Cx(t) + Qw(t)$$

$$\mathbb{R}^8 \ni w(t) = \begin{bmatrix} V_{DC} & v_R^r & i_C^r & i_A^r & V_\alpha(t) & V_\beta(t) & i_\alpha^r(t) & i_\beta^r(t) \end{bmatrix}^\mathsf{T}$$

La matrice semi-simple S est tel que $\sigma(S) = \{\mathbf{0}_4^\mathsf{T}, i\omega, -i\omega, i\omega, -i\omega\} \subset i\mathbb{R}$.

Est-il possible de satisfaire le cahier des charges défini précédement avec le convertisseur choisi ?

Formulation du problème

Le problème

Etant donnée l'architecture du smart node précédent, cette dernière satisfait le cahier des charges si et seulement s'il existe $\Pi : \mathbb{R}^8 \to \mathbb{R}^{23}$ et $\Psi : \mathbb{R}^8 \to \mathbb{R}^8$, solution des équations du régulateur non-linéaire :

$$\frac{\partial \Pi(w)}{\partial w} Sw = A\Pi(w) + B(\Pi(w))\Psi(w) + Pw \tag{2a}$$

$$C\Pi(w) = -Qw \tag{2b}$$

Les solutions de ces équations donnent lieu aux trajectoires d'entrée et d'état à l'équilibre $x_e(t) = \Pi(w(t))$ et $u_e(t) = \Psi(w(t))$.

Sommaire

Introduction

Modélisation

Un ensemble de solution au problème

Conclusion & Perspectives

Solution

Proposition

Pour tout $\mu, \tau \in \mathbb{R}$, les applications suivantes sont solutions de (2) :

$$w \mapsto \Pi(w) = \Pi_0 w + N_0 \Gamma(w) + N \begin{bmatrix} \mu & \tau \end{bmatrix}^\intercal \tag{3a}$$

$$w \mapsto \Psi(w) = \frac{1}{v_R^r}(\Pi_v(w) - L_F \Pi_{i_F} S w) \tag{3b}$$

$$\Pi(w) = \begin{bmatrix} \Pi_{v_R}(w)^\intercal & \Pi_{i_F}(w)^\intercal & \Pi_v(w)^\intercal & \Pi_{i_G}(w)^\intercal \end{bmatrix}^\intercal$$

- Une partie des états est linéaire en w
- $\Gamma(w)$ est solution d'un polynome de degré 2 (bilan de puissance au niveau du condensateur réservoir)
- $\Gamma(w)$ est constant dans le temps ($\frac{\partial \Gamma(w)}{\partial w} S w = 0$)
- Physiquement, μ et τ correspondent aux tensions homopolaires de DC et AC du système.

$$w \mapsto \Pi(w) = \Pi_0 w + N_0 \Gamma(w) + N \begin{bmatrix} \mu & \tau \end{bmatrix}^\intercal$$

$$w \mapsto \Psi(w) = \frac{1}{v_R^r}(\Pi_v(w) - L_F \Pi_{i_F} S w)$$

$$\Pi(w) = \begin{bmatrix} \Pi_{v_R}(w) \\ \Pi_{i_F}(w) \\ \Pi_v(w) \\ \Pi_{i_G}(w) \end{bmatrix}$$

Solution

- Une partie des états est linéaire en w
- $\Gamma(w)$ est solution d'un polynome de degré 2 (bilan de puissance au niveau du condensateur réservoir)
- $\Gamma(w)$ est constant dans le temps ($\frac{\partial \Gamma(w)}{\partial w} S w = 0$)
- Physiquement, μ et τ correspondent aux tensions homopolaires de DC et AC du système.

$$w \mapsto \Pi(w) = \Pi_0 w + N_0 \Gamma(w) + N \begin{bmatrix} \mu & \tau \end{bmatrix}^\intercal$$

$$w \mapsto \Psi(w) = \frac{1}{v_R^r} (\Pi_v(w) - L_F \Pi_{i_F} S w)$$

$$\Pi(w) = \begin{bmatrix} \Pi_{v_R}(w) \\ \Pi_{i_F}(w) \\ \Pi_v(w) \\ \Pi_{i_G}(w) \end{bmatrix}$$

Solution

- Une partie des états est linéaire en w
- $\Gamma(w)$ est solution d'un polynome de degré 2 (bilan de puissance au niveau du condensateur réservoir)
- $\Gamma(w)$ est constant dans le temps ($\frac{\partial \Gamma(w)}{\partial w} S w = 0$)
- Physiquement, μ et τ correspondent aux tensions homopolaires de DC et AC du système.

$$w \mapsto \Pi(w) = \Pi_0 w + N_0 \Gamma(w) + N \begin{bmatrix} \mu & \tau \end{bmatrix}^\top$$

$$w \mapsto \Psi(w) = \frac{1}{v_R^r}(\Pi_v(w) - L_F \Pi_{i_F} S w)$$

$$\Pi(w) = \begin{bmatrix} \Pi_{v_R}(w) \\ \Pi_{i_F}(w) \\ \Pi_v(w) \\ \Pi_{i_G}(w) \end{bmatrix}$$

Solution

- Une partie des états est linéaire en w
- $\Gamma(w)$ est solution d'un polynome de degré 2 (bilan de puissance au niveau du condensateur réservoir)
- $\Gamma(w)$ est constant dans le temps ($\frac{\partial \Gamma(w)}{\partial w} S w = 0$)
- Physiquement, μ et τ correspondent aux tensions homopolaires de DC et AC du système.

$$w \mapsto \Pi(w) = \Pi_0 w + N_0 \Gamma(w) + N \begin{bmatrix} \mu & \tau \end{bmatrix}^\intercal$$

$$w \mapsto \Psi(w) = \frac{1}{v_R^r}(\Pi_v(w) - L_F \Pi_{i_F} S w)$$

$$\Pi(w) = \begin{bmatrix} \Pi_{v_R}(w) \\ \Pi_{i_F}(w) \\ \Pi_v(w) \\ \Pi_{i_G}(w) \end{bmatrix}$$

Simulation

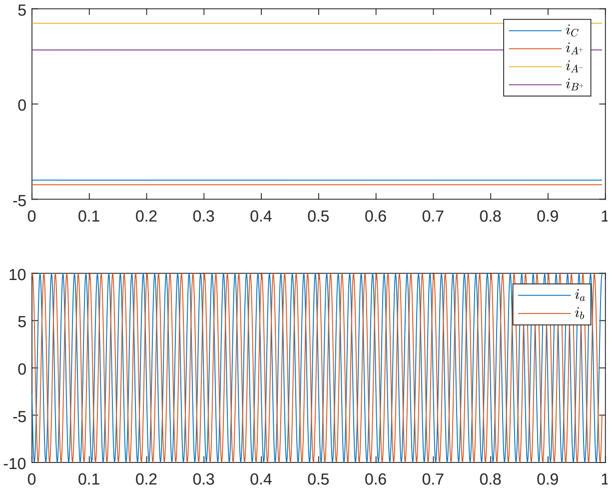


Figure – Les courants dans le réseau à l'équilibre désiré

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} v_{R,e}(t) \\ i_{\mathrm{F},e}(t) \\ v_e(t) \\ i_{\mathrm{G},e}(t) \end{bmatrix}$$

$$u_e(t) = \begin{bmatrix} d_C(t) \\ d_{A^+}(t) \\ d_{A^-}(t) \\ d_{B^+}(t) \\ d_{B^-}(t) \\ d_a(t) \\ d_b(t) \\ d_c(t) \end{bmatrix}$$

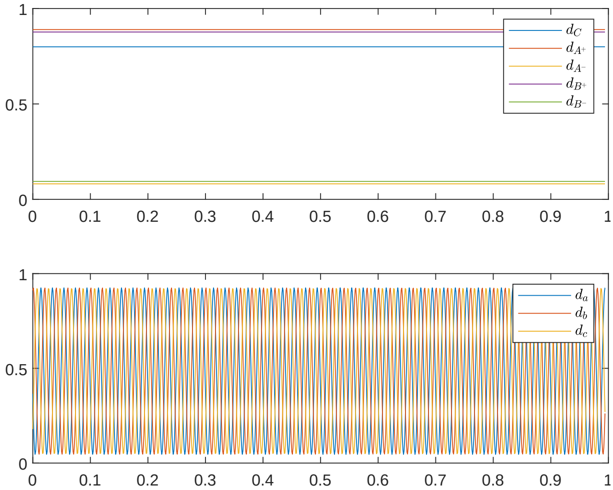


Figure – Les rapports cycliques à l'équilibre désiré

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} v_{R,e}(t) \\ i_{\mathrm{F},e}(t) \\ v_e(t) \\ i_{\mathrm{G},e}(t) \end{bmatrix}$$

$$u_e(t) = \begin{bmatrix} d_C(t) \\ d_{A^+}(t) \\ d_{A^-}(t) \\ d_{B^+}(t) \\ d_{B^-}(t) \\ d_a(t) \\ d_b(t) \\ d_c(t) \end{bmatrix}$$

Introduction

Modélisation

Un ensemble de solution au problème

Conclusion & Perspectives

Conclusion

A partir du cas d'étude :

- Modéliser le circuit
- Formaliser le problème dans le cadre de la régulation de sortie
- Trouver une solution au problème

Ce qui prouve la pertinence du circuit vis-à-vis des objectifs de commande

Perspectives

Travaux de thèse : "Eco-conception d'une architecture de réseau mixte AC/DC maillé"

- synthèse de lois de commande robustes pour le convertisseur ;
- analyse de cycle de vie et éco-dimensionnement d'un réseau maillé AC/DC.

Conclusion

A partir du cas d'étude :

- Modéliser le circuit
- Formaliser le problème dans le cadre de la régulation de sortie
- Trouver une solution au problème

Ce qui prouve la pertinence du circuit vis-à-vis des objectifs de commande

Perspectives

Travaux de thèse : "Eco-conception d'une architecture de réseau mixte AC/DC maillé"

- synthèse de lois de commande robustes pour le convertisseur ;
- analyse de cycle de vie et éco-dimensionnement d'un réseau maillé AC/DC.

Bibliography

[1] Y. Takahashi, K. Natori, and Y. Sato, "A multi-terminal power flow control method for next-generation DC power network," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (Montreal, QC, Canada), pp. 6223–6230, IEEE, Sept. 2015.

[2] H. Morel, L. Michel, G. Clerc, P. Bevilacqua, M. Barara, V. Steinmetz, and B. Peron, "Microréseaux DC : avantages des réseaux maillés,"

[3] F. Amato, C. Cosentino, and A. Merola, "Stabilization of Bilinear Systems via Linear State Feedback Control,"

[4] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, and J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations : dq0, Clarke, and Park," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, pp. 2070–2083, Dec. 2019.

[5] J. Huang, *Nonlinear Output Regulation : Theory and Application*. 2004.

Remerciements

lukas.cafran@insa-lyon.fr