

Détection, isolation et estimation des défauts pour un onduleur triphasé connecté au réseau DC-AC triphasé avec filtre LCL*

Marouane Laaziz^{1,2}, Florentina Nicolau³, **Malek Ghanes**¹, Nadia Machkour²
Jean-Pierre Barbot^{1,3}, Robert Boisliveau¹

1: LS2N UMR CNRS 6004, Nantes Université-Ecole Centrale de Nantes, France

2: LCCPS, ENSAM, Université Hassan 2 de Casablanca, Maroc

3: Quartz EA 7393, ENSEA, Cergy-Pontoise, France

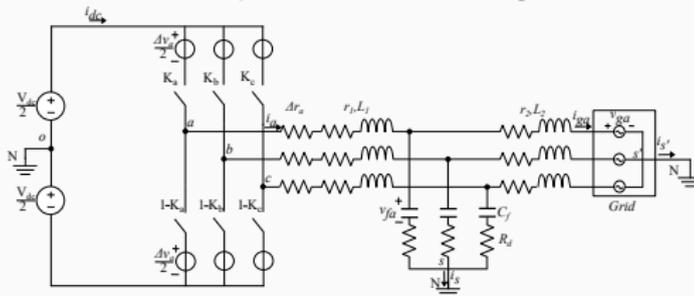
* Soumis à IEEE L-CSS et CDC 2024.

1. Problématique et Principe
2. Modèle
3. Detection, Localisation et Estimation des défauts
4. Résultats de simulation
5. Conclusions et perspective

Problématique et Principe

Problématique : positionnement

- Les micro-réseaux sont généralement composés d'un système multi-sources pour produire de l'énergie, d'un bus DC et d'un onduleur qui interface le bus DC avec le réseau et/ou la charge.
- Défauts onduleurs côté source (éolien, ombre sur les PV)
- Défauts composants des onduleurs (commutation)
- Défauts onduleurs côté réseau (chutes de tension, perturbations)
- La détection des défauts est très importante pour préserver l'ensemble de la chaîne de production d'énergie.



Problématique : littérature

- Plusieurs méthodes proposées :
- Calcul des pertes dans chaque phase [1]
- Techniques d'optimisation [2], de l'IA [3] et de l'injection [4]
- Techniques basées modèles [5]

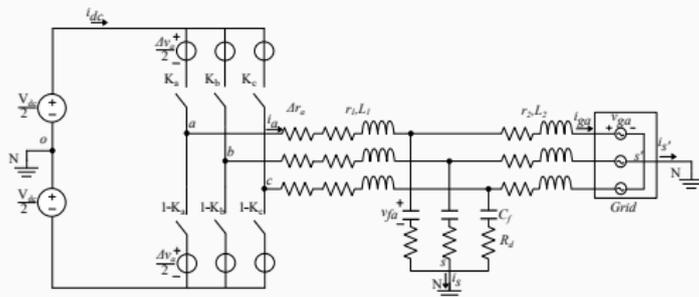
[1] Abraham, Y.H., Wen, H., Xiao, W., Khadkikar, V., 2011. Estimating power losses in Dual Active Bridge DC-DC converter, in: 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS).

[2] V. Gomathy and S. Selvaperumal, "Fault Detection and Classification with Optimization Techniques for a Three-Phase Single-Inverter Circuit," *Journal of Power Electronics*, vol. 16, pp. 1097–1109, 2016.

[3] N. Raj, G. Jagadanand, and S. George, "Fault detection and diagnosis in asymmetric multilevel inverter using artificial neural network," *International Journal of Electronics*, vol. 105, pp. 559–571, 2018.

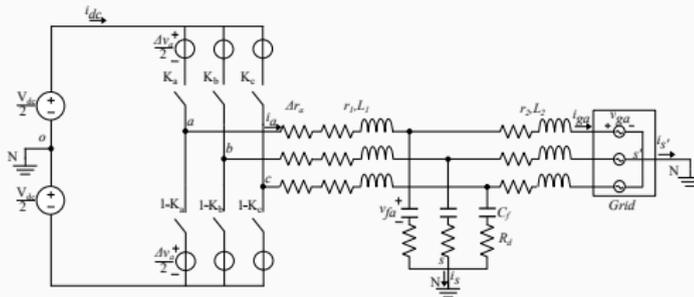
[4] U.-M. Choi, J.-S. Lee, F. Blaabjerg, and K.-B. Lee, "Open-Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for a Grid-Connected NPC Inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 7234–7247, 2016.

[5] Shahin, A., Abulanwar, S., Ghanem, A., Rizk, M.E.M., Deng, F., Pierfederici, S., Ismael, I., 2022. Sensorless Robust Flatness-Based Control With Nonlinear Observer for Non-Ideal Parallel DC-AC Inverters. *IEEE Access* 10, 53940–53953.



Principe et contributions

- Détection, isolation et estimation des défauts physiques (source, composants, filtre réseau):



- Modélisation de l'onduleur dans le système triphasé (a,b,c)
- Modélisation des défauts par des sources de tension et des résistances
- Equations algèbro-différentielles et différentiateurs en temps fini [3]
- Filtres LCL

[3] Ghanes, M., et al. (2022). Arbitrary order differentiator with varying homogeneity degree. Automatica, 138, 110111.

Modèle

Modèle moyen du système étudié

Le modèle moyen (pour la phase j) associé à la topologie étudiée est

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}}{dt} = & -\frac{r_1 + R_d + \Delta r_l}{L_1} \bar{i} + \frac{R_d}{L_1} \bar{i}_g - \frac{1}{L_1} \bar{v}_f - \frac{V_{dc}}{2L_1} + \frac{\Delta v_l}{L_1} \\ & + \frac{1}{L_1} \left(-(\Delta r_h - \Delta r_l) \bar{i} - \Delta v_h - \Delta v_l + V_{dc} \right) \alpha \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\frac{d\bar{i}_g}{dt} = \frac{R_d}{L_2} \bar{i} - \frac{r_2 + R_d}{L_2} \bar{i}_g + \frac{1}{L_2} \bar{v}_f - \frac{1}{L_2} v_g \quad (1b)$$

$$\frac{d\bar{v}_f}{dt} = \frac{1}{C_f} \bar{i} - \frac{1}{C_f} \bar{i}_g, \quad (1c)$$

- α est le rapport cyclique.
- $y = [\bar{i}, \bar{i}_g]^T$ sont les mesures.
- Modélisation et estimation des défauts par des sources fictives de tension continue Δv_{jh} et Δv_{jl} , et des résistances fictives Δr_{jh} et Δr_{jl} , pour chaque phase j dans $\{a, b, c\}$.

Detection, Localisation et Estimation des défauts

- Considérons les équations (1a) et (1b):

$$\frac{d\bar{i}}{dt} = -\frac{r_1 + R_d + \Delta r_l}{L_1} \bar{i} + \frac{R_d}{L_1} \bar{i}_g - \frac{1}{L_1} \bar{v}_f - \frac{V_{dc}}{2L_1} + \frac{\Delta v_l}{L_1} + \frac{1}{L_1} \left(-(\Delta r_h - \Delta r_l) \bar{i} - \Delta v_h - \Delta v_l + V_{dc} \right) \alpha \quad (2a)$$

$$\frac{d\bar{i}_g}{dt} = \frac{R_d}{L_2} \bar{i} - \frac{r_2 + R_d}{L_2} \bar{i}_g + \frac{1}{L_2} \bar{v}_f - \frac{1}{L_2} v_g$$

- Les dérivées $\frac{d\bar{i}_a}{dt}$ et $\frac{d\bar{i}_{ga}}{dt}$ sont estimées par un différenciateur
- Les défauts Δv_{jh} , Δv_{jl} , Δr_{jh} et Δr_{jl} sont estimés par un algorithme FIFO sur une fenêtre glissante de largeur constante $m\delta$ en utilisant (2a).

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}}{dt} = & -\frac{r_1 + R_d + \Delta r_l}{L_1} \bar{i} + \frac{R_d}{L_1} \bar{i}_g - \frac{1}{L_1} \bar{v}_f - \frac{V_{dc}}{2L_1} + \frac{\Delta v_l}{L_1} \\ & + \frac{1}{L_1} \left(-(\Delta r_h - \Delta r_l) \bar{i} - \Delta v_h - \Delta v_l + V_{dc} \right) \alpha \end{aligned}$$

- A chaque instant t_k , $k \geq m - 1$, résoudre un système de $m > 4$ équations linéaires : $\Gamma(t_k)P = N(t_k)$, avec

$$P = [\Delta v_h, \Delta r_h, \Delta v_l, \Delta r_l]^\top$$

$$\Gamma(t_k) = [\alpha(t_{k-\ell+1}), \quad \alpha(t_{k-\ell+1}) \hat{i}(t_{k-\ell+1}), \quad -(1 - \alpha(t_{k-\ell+1})), \\ (1 - \alpha(t_{k-\ell+1}) \hat{i}(t_{k-\ell+1}))], \quad 1 \leq \ell \leq m,$$

$$\begin{aligned} N_\ell(t_k) = & -L_1 \frac{d\hat{i}}{dt}(t_{k-\ell+1}) - (r_1 + R_d) \hat{i}(t_{k-\ell+1}) - \frac{V_{dc}}{2} \\ & + R_d \hat{i}_g(t_{k-\ell+1}) - \hat{v}_f(t_{k-\ell+1}) + V_{dc} \alpha(t_{k-\ell+1}), \quad 1 \leq \ell \leq m. \end{aligned}$$

- En calculant la pseudo-inverse de la matrice $\Gamma(t_k)$, on peut déduire P à chaque instant t_k , pour $k \geq m$: $P = \Gamma^\dagger(t_k)N(t_k)$, avec Γ^\dagger est la pseudo-inverse de la matrice Γ .

Algorithm 1 Fault detection, isolation and estimation algorithm (under single fault assumption)

```
1: Inputs: measurements  $\bar{v}_j$  and  $\bar{v}_{jg}$ , known input  $v_{jg}$ , and
   parameters of items (NP1)–(NP4) in simulation
2: for  $k \geq m - 1$  do
3:   for  $j \in \{a, b, c\}$  do
4:     Estimate the time-derivative  $\frac{di_x}{dt}$ ,  $\frac{di_{jg}}{dt}$  from (3)
5:     Estimate the capacitor voltage  $\hat{v}_{jf}$  from (5)
6:     Estimate the voltage and resistance variation
        $\hat{\Delta}v_{jh}$ ,  $\hat{\Delta}r_{jh}$ ,  $\hat{\Delta}v_{jl}$ ,  $\hat{\Delta}r_{jl}$  from (10)
7:   end for
8:   if  $|\hat{\Delta}v_{jh}| > S_1$  or  $|\hat{\Delta}v_{jl}| > S_2$  or  $|\hat{\Delta}r_{jh}| > S_3$  or
      $|\hat{\Delta}r_{jl}| > S_4$ , for at least one  $j \in \{a, b, c\}$ , then
9:     Display faulty behavior at time  $t_k$ 
10:    if  $|\hat{\Delta}v_{jh} - \hat{\Delta}v_{jl}| > S_5$  or  $|\hat{\Delta}r_{jh} - \hat{\Delta}r_{jl}| > S_6$ , for
      at least one  $j \in \{a, b, c\}$ , then
11:      Display asymmetrical fault at time  $t_k$ 
12:      if  $|\hat{\Delta}v_{js} - \hat{\Delta}v_{j's}| < S_7$  and  $|\hat{\Delta}r_{js} - \hat{\Delta}r_{j's}| < S_8$ ,
        for all  $j, j' \in \{a, b, c\}$  and  $s \in \{h, l\}$ , then
13:        Display DC bus fault (asymmetrical) at time  $t_k$ 
14:      else
15:        Display switch fault at time  $t_k$ 
16:      end if
17:    else
18:      Display symmetrical fault at time  $t_k$ 
19:      if  $|\hat{\Delta}v_{js} - \hat{\Delta}v_{j's}| < S_7$  and  $|\hat{\Delta}r_{js} - \hat{\Delta}r_{j's}| < S_8$ ,
        for all  $j, j' \in \{a, b, c\}$  and  $s \in \{h, l\}$ , then
20:        Display DC bus fault (symmetrical) at time  $t_k$ 
21:      else
22:        Display filter fault at time  $t_k$ 
23:      end if
24:    end if
25:  else
26:    Display healthy behavior at time  $t_k$ 
27:  end if
28: end for
```

- **Détection:**

Si au moins, dans une phase, l'estimation des variations de tension ou de résistance dépasse en valeur absolue son seuil désigné (voir ligne 8 de l'algorithme), alors **au moins un défaut se produit dans le système**. Par conséquent, l'algorithme détecte les défauts même dans les scénarios où plusieurs défauts se produisent simultanément.

- **Isolation et Estimation:** elles sont garanties dans l'hypothèse d'un seul défaut dans le système.
 - Si une asymétrie se produit dans au moins une phase (voir les lignes 10 et 11), un défaut asymétrique du bus DC ou un switch défectueux est localisé et estimé (lignes 12–13 et 15, respectivement) ; autrement, des défauts symétriques sont présents.
 - Si les défauts symétriques sont les mêmes dans toutes les trois phases (lignes 19 et 20), un bus DC défectueux est localisé et estimé.
 - Si le défaut symétrique est présent pour une seule phase, un défaut dans le filtre LCL est localisé et estimé (ligne 22).

Résultats de simulation

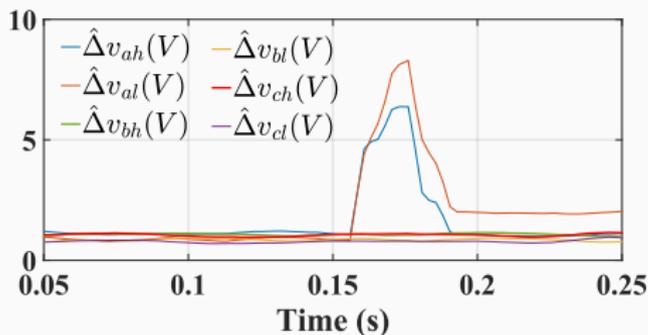
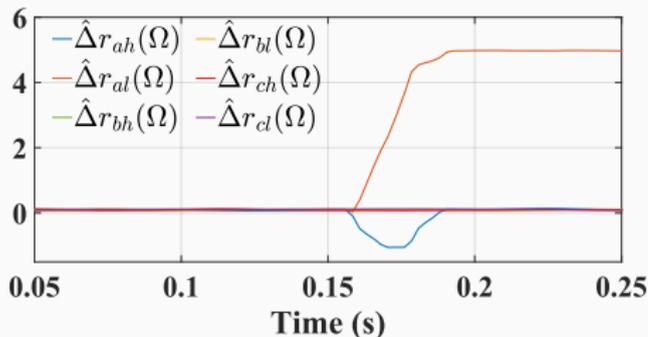
Paramètres de simulation

- Commande par platitude
- Euler Ode1 de Matlab/Simulink, pas de 10^{-6} s.

- (NP1) : *Paramètres sains du système*: $V_{dc} = 350$ V, $f_g = 50$ Hz, fréquence de commutation $f_{sw} = 10$ kHz, $I_{max} = 6,5$ A, $I_{g\ max} = 6$ A, v_{jg} , $V_{jg\ max} = 96$ V, $L_1 = 10$ mH, $L_2 = 1$ mH, $C_f = 4.5$ μ F, $R_d = 1$ Ω , $r_1 = 1$ Ω , $r_2 = 0.5$ Ω , et $\Delta v_{jh} = \Delta v_{jl} = 1$ V et $\Delta r_{jh} = \Delta r_{jl} = 0.1$ Ω , pour tout $j \in \{a, b, c\}$;
- (NP2) : *Seuils*: $S_1 = S_2 = 1.25$ V, $S_3 = S_4 = 0.15$ Ω , $S_5 = S_7 = 0.25$ V, $S_6 = S_8 = 0.05$ Ω ;
- (NP3) : *Differentiator*: $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 1$, $\mu = 3162$;
- (NP4) : *Filtre des mesures*: Filtre passe bas Butterworth du deuxième ordre, avec une fréquence de coupure $f_{cut} = 250$ Hz.

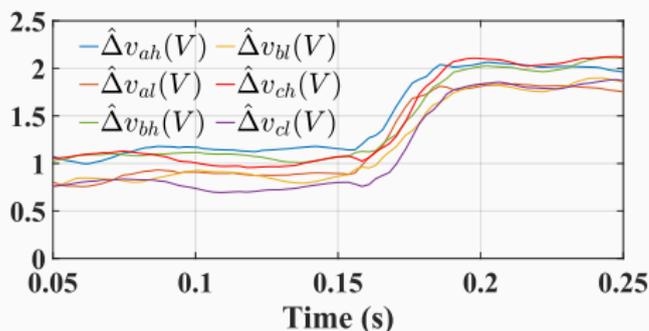
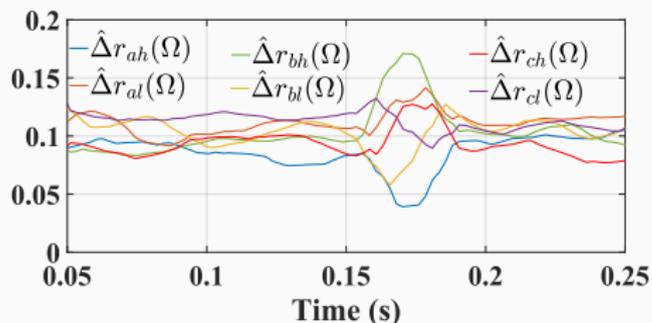
Résultats de simulation

- Défaut asymétrique: le switch du bras bas de la phase a est mal fermé. Ce défaut entraîne une augmentation de Δr_{al} de 5Ω (par rapport à sa valeur saine) et une chute de tension Δv_{al} de $2 V$.



Résultats de simulation

- Défaut symétrique: Une chute de tension du bus continu est simulée à 0, 15 s par les variations de tension Δv_{jh} et Δv_{jl} , pour j dans $\{a, b, c\}$, de 2 V au lieu de 1 V.



Conclusions et perspective

Conclusions et perspective

- Méthode pour la détection, l'isolation et l'estimation des défauts de l'onduleur triphasé connecté au réseau avec des filtres LCL, modélisés dans le repère physique, *abc*.
- Les défauts du système sont modélisés à l'aide de sources fictives de tension continue et de résistances fictives pour chaque phase.
- La méthodologie proposée est basée sur une technique d'inversion à gauche et implique l'estimation de la tension du condensateur et des variations de tension et de résistance en mesurant simplement les courants et en utilisant un différentiateur pour déterminer les dérivées des courants.
- Une perspective possible de ce travail est de concevoir une commande active tolérante aux défauts. L'objectif de cette loi est de préserver des performances acceptables en termes de suivi de trajectoire et d'équilibre entre les phases.