



### Soirée des doctorants

Thèmes : « Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence des énergies renouvelables intermittentes » et « Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe »

Le bureau français de l'IEEE PES vous convie à la soirée annuelle des doctorants, au cours de laquelle les deux lauréates du prix de l'année, viendront présenter leurs travaux. Nous leur donnerons la parole sur deux thèmes variés. Les exposés seront introduits par les responsables industriels concernés qui viendront expliciter les enjeux des travaux présentés.

Carmen Cardozo présentera ses travaux visant à résoudre un problème de placement de production tenant compte des contraintes dynamiques de sécurité du système afin de garantir du maintien de la fréquence du système au-dessus d'un seuil déterminé en cas d'incident.

Marjorie Cosson exposera ses travaux sur le maintien de la tension dans des bornes admissibles sur les réseaux de distribution. En effet, les régulations de tension des producteurs distribués risquent d'interagir causant des oscillations de tension. L'objet de la thèse est de qualifier les conditions de stabilité de ces régulations.

### Organisation et Parrainage

- Chapitre français de l'IEEE PES (Power & Energy Society)
- Avec l'appui de la SEE (Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication) – Club technique « Systèmes électriques »

### Jeudi 31 Mars 2016 de 17h30 à 19h30

RTE - Tour Initiale – 1, terrasse Bellini Paris - La Défense

- **17h30** Accueil et introduction Sébastien Henry, Président du bureau français de l'IEEE PES, Directeur SI & Télécommunications, RTE
- 17h40 Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence des énergies renouvelables intermittentes Carmen Cardozo (CentraleSupelec et EDF R&D), introduction par Laurent Capely (EDF R&D)
- 18h30 Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe Marjorie Cosson (CentraleSupelec et EDF R&D), introduction par Vincent Gabrion (EDF R&D)

19h30 Pot de l'amitié

### **Inscription et Renseignements**

Inscription en ligne gratuite : <u>http://bit.ly/1gNuQWb</u>

Après la soirée, les présentations sont disponibles sur <u>http://ewh.ieee.org/r8/france/pes/</u>

Lieu

RTE - <u>Tour Initiale</u> **1, terrasse Bellini, Paris - La Défense** Métro ligne 1– Station : Esplanade de la Défense Plan : <u>http://bit.ly/1iZ39Jy</u>



# Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence d'ENR intermittentes Intégration de contraintes de déploiement de la réserve primaire dans un outil de placement journalier de production

Soirée des doctorants IEEE PES France – 31 mars 2016 Laurent CAPELY EDF R&D / Département EFESE

















Augmentation de la puissance ENR installée sans renforcement de la contribution des ENR à la sureté système



Politique risque respectée



Consommation

**Compensation de la variabilité infra-horaire** + tenue de l'ensemble des ENR au creux de tension HTB



Politique risque respectée



Politique risque non respectée

**Consommation** 

Modification des réglages des protections de découplage + optimisation du plan de délestage



Politique risque respectée

Taux d'insertion instantané



Consommation

| 8



Politique risque respectée

• Politique risque non respectée

Taux d'insertion instantané

Consommation

**Optimisation du plan de production avec contraintes dynamiques** 







Taux d'insertion instantané

Politique risque non respectée

| 10

Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence d'ENR intermittentes Intégration de contraintes de déploiement de la réserve primaire dans un outil de placement journalier de production

#### Carmen Cardozo

Ph. Dessante M. Petit L. Capely V. Silva W. van Ackooij



Soirée des doctorants IEEE PES France - SEE 31 mars 2016 lodélisation Intégration des EnR Contraintes de sûreté renforcées Nouvelle formulation du problème FCUC Conclusions 0000 0000 0000 0000 000 000000000 000

### Contributions de la thèse

- Étudier la relation entre le creux de fréquence et les variables d'optimisation du modèle UC (Unit Commitment).
- Quantifier l'impact des sources non-synchrones sur la performance de la régulation primaire de fréquence.
- Analyser le coût et les bénéfices de différentes mesures palliatives (*e.g.*, écrêtement, inertie, soutien dynamique).
- Proposer une nouvelle formulation du problème FCUC (Frequency Constrained Unit Commitment).

 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 Nouvelle formulation du problème FCUC
 Conclusions

 0000
 0000
 0000
 0000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000

#### Plan de la présentation

#### Modélisation

- Outil de placement de production
- Régulation primaire de fréquence
- Approche de simulation et cas d'étude

#### 2 Intégration des EnR

- Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC

#### **5** Conclusions



$$\begin{array}{ll} \displaystyle \min_{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}} & f_0(g, u) \\ \text{sous contraintes} & f_i(g, u) \leq 0 \qquad i = 1, \dots, i, \\ & g_\ell(g, u) = 0 \qquad \ell = 1, \dots, l, \end{array}$$

où :

- **(**  $g, u \rightarrow \text{programme d'appel (état et puissance de consigne).}$
- 2  $f_0 : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$  représente le coût de production.
- $f_i : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R} \quad \forall i = 1, ..., i$ , sont les contraintes d'inégalité :
  - Limites de capacité ( $G_i^{max}$  et  $G_i^{min}$ ).
  - Limites sur les gradients horaires de puissance  $(R_i^{up} \text{ et } R_i^{dn})$ .
  - Temps minimum de marche/arrêt  $(T_i^{up} \text{ et } T_i^{dn})$ .
  - Critère de sûreté : prescription de réserve (*R<sup>min</sup>*).
  - Limites d'allocation de réserve ( $R_i^{max}$ ).

•  $g_{\ell} : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R} \quad \forall \ell = 1, \dots, I, \text{ sont les contraintes d'égalité :}$ 

• Équilibre offre-demande (D)...

Modélisation 0000	Intégration des EnR 0000		Nouvelle formulation du problème FCUC	
Régula	ation primai	ire de fréquence	Placement g,u Régulation fréquence	
-		Equivalent Machin	A Auti Maabina	
$\sim$		Equivalent-Machine	e Muiti-Machine	
(:)	Avantages	Expression analytique	Paramètres des groupes	;
$(\cdot)$	Limitations	Calcul paramètres	Complexité / Hypothèse	S

On propose une version modifiée du modèle *Multi-Machine* avec saturation de la puissance produite.



Pas d'expression analytique pour  $f_{min}(g, u, D(t), \Delta P, ...)$ . Le modèle est résolu par une méthode d'intégration numérique à pas fixe. 
 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 Nouvelle formulation du problème FCUC
 Conclusions

 000
 0000
 0000
 0000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000

#### Simulation séquentielle



Cas d'étude : système de type insulaire avec 18 groupes thermiques.



 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 Nouvelle formulation du problème

 000
 0000
 0000
 00000000

Conclusions

#### Régulation primaire de fréquence

#### Creux de fréquence pour toute perte de groupe sur une année.



**Objectif 1 :** étudier la relation entre le creux de fréquence et les variables d'optimisation du modèle UC.

 $f_{min}(g, u, H_j, \tau_j, R_j, S_{n,j}, G_j^{max}, R_j^{max}, D(h), g_k).$ 

Problème FCUC difficile à formuler car la contrainte sur le creux de fréquence est non-linéaire et implicite.

Modélisation 0000 Intégration des EnR

Contraintes de sûreté renforcé 2000 Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions 000

#### Plan de la présentation

#### Modélisation

#### Intégration des EnR

- Scénarios de développement du PV
- Modification des programmes d'appel
- Impact sur l'évolution de la fréquence
- Besoin d'un renforcement des contraintes de sûreté

#### Contraintes de sûreté renforcées

4 Nouvelle formulation du problème FCUC

#### **5** Conclusions

Modélisation 0000 Intégration des EnR

Contraintes de sûreté renforcées

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Scénarios de développement du PV



Intégration des EnR 0000

### Modification des programmes d'appel



Modélisation 0000 Intégration des EnR

Contraintes de sûreté renforc 0000 Nouvelle formulation du problème FCUC 00000000

Conclusions

### Modification des programmes d'appel



- ② ↑ Arrêt/Démarrage
- 𝔅 ↓ Nombre d'unités



Modélisation 0000 Intégration des EnR

ontraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC 00000000

Conclusions

#### Modification des programmes d'appel



③ ↓ Nombre d'unités

④ ↓ Énergie cinétique



 Modélisation
 Intégration des EnR

 0000
 0000

es EnR Contraintes d

de sûreté renforcées Nouvelle

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

#### Modification des programmes d'appel

① (1) Marges

② ↑ Arrêt/Démarrage

⑧ ↓ Nombre d'unités

•  $\Downarrow$   $\Downarrow$  Énergie cinétique

démarrée





 Viodélisation
 Intégration des EnR

 0000
 0000

s EnR Contraintes de 0000

aintes de sûreté renforcées N c

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Modification des programmes d'appel



Impact sur l'évolution de la fréquence



Intégration des EnR



 délisation
 Intégration des EnR
 Contraintes

 DO
 0000
 0000

e sûreté renforcées Nouvelle for

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Impact sur l'évolution de la fréquence



#### Impact sur l'évolution de la fréquence

Intégration des EnR



Nouvel indice : Periods with Insufficient Dynamic Response (PIDR) Contribution 2 : UC  $\rightarrow$  MMR-ROSFR  $\Rightarrow$  effets contre-intuitifs. **Objectif 2 :** quantifier l'impact des sources non-synchrones sur la performance de la régulation primaire de fréquence. 
 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 N

 0000
 000●
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 0000
 <

Nouvelle formulation du problème FCUC 00000000

Conclusions

#### Besoin d'un renforcement des contraintes de sûreté

Risque de délestage avec le développement des EnR intermittentes :

	0 MW	70 MW	130 MW	190 MW	250 MW
PIDR (h/y)	0	0	12	19	33

2 Coût de fourniture de la réserve primaire par scénario :

	0 MW	70 MW	130 MW	190 MW	250 MW
Cost (%)	6.3	7.3	8.0	9.0	10.4

- Solution Dispersion accrue des besoins en réserve. Rappel :  $\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{N} r_j^{h,pr} \ge g_k^h$ .
- Différents leviers pour améliorer la performance de la régulation primaire de fréquence :

Rappel :  $f_{min}(g, u, H_j, \tau_j, R_j, S_{n,j}, G_j^{max}, R_j^{max}, D(h), g_k)$ .

Contraintes de sûreté renforcées

#### Plan de la présentation

Contraintes de sûreté renforcées Contraintes indirectes Analyse coût/bénéfice



Ν

j=1 $i\neq k$ 

 $\sum r_i^{h,pr} \ge g_k^h$ 

 $\forall h = 1, \ldots, T, \forall k = 1, \ldots, N.$ 



On cherche à formuler le problème Frequency Constrained UC.  $\underline{q} \rightarrow \text{seuil de sûreté (Hz)} \quad q_m \rightarrow \text{creux de fréquence (Hz)}$ 



On cherche à formuler le problème "Frequency" Constrained UC.  $\underline{q} \rightarrow \text{seuil de sûreté (Hz)} \quad q_m \rightarrow \text{creux de fréquence (Hz)}$  Modélisation 0000 égration des EnR

Contraintes de sûreté renforcées

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$		
Prescription d'une			
inertie minimale			
Effacement des EnR			
Soutien dynamique			

Intégration des EnR Contraintes de sûreté renforcées 0000

#### Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
Prescription d'une			
inertie minimale			
Effacement des EnR			
Soutien dynamique			

✓\*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...
# Coût/bénéfices des mesures palliatives

	UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
	Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
	Prescription d'une inertie minimale			
	Effacement des EnR			
	Soutien dynamique			

✓\*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...



 $\begin{array}{l} \underset{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}}{\text{minimiser}} \quad f_0(g, u) \\ \text{sous contraintes} \quad f_i(g, u) \leq 0 \qquad \qquad \forall i = 1, \dots, i, \\ g_\ell(g, u) = 0 \qquad \qquad \forall \ell = 1, \dots, I, \\ \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^N r_j^{h, pr} \geq g_k^h \qquad \qquad \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\ \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq K E^{min} \qquad \qquad \forall h = 1, \dots, T. \end{array}$ 







$$\begin{array}{ll} \underset{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}}{\text{minimiser}} & f_0(g, u) \\ \text{ous contraintes} & f_{\iota}(g, u) \leq 0 & \forall \iota = 1, \dots, i, \\ & g_{\ell}(g, u) = 0 & \forall \ell = 1, \dots, I, \\ & \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^{N} r_j^{h, pr} \geq g_k^h & \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\ & \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \geq K E_{-k}^{min} & \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N. \end{array}$$

S

[1] P. Daly, D. Flynn, and N. Cunniffe. Inertia considerations within unit commitment and economic dispatch for systems with high non-synchronous penetrations. PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, pages 1-6, June 2015.



$$\begin{array}{l} \underset{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}}{\text{minimiser}} f_0(g, u) \\ \text{sous contraintes} \quad f_{\iota}(g, u) \leq 0 \\ g_{\ell}(g, u) = 0 \\ & \forall \iota = 1, \dots, i, \\ g_{\ell}(g, u) = 0 \\ & \forall \ell = 1, \dots, I, \\ \\ \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^{N} r_j^{h, pr} \geq g_k^h \\ & \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\ \\ & \sum_{\substack{j=1\\j \neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF^{max}} g_k^h \quad \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N. \end{array}$$

 P. Daly, D. Flynn, and N. Cunniffe. Inertia considerations within unit commitment and economic dispatch for systems with high non-synchronous penetrations. PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, pages 1-6, June 2015.
 R. Doherty, G. Lalor, and M. O'Malley. Frequency control in competitive electricity market dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3):1588-1596, 2005.

# Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
Prescription d'une	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge K E_{-k}^{min}$	€€	✓*
inertie minimale	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge \frac{f_0}{2ROCOFmax} g_k^h$	€	✓*
Effacement des EnR			
Soutien dynamique			

✓\*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...

## Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
Prescription d'une	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge K E_{-k}^{min}$	€€	✓*
inertie minimale	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge \frac{f_0}{2ROCOFmax} g_k^h$	€	✓*
Effacement des EnR	$\sum_{j=1}^{N} g_j^h + VG^h = D^h$	€*	$\wedge$
Soutien dynamique			

✓\*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...

€\*: un niveau limité d'effacement peut réduire le coût.

 $\bigwedge$ : effets contre-productifs liés aux contraintes inter-temporelles.

# Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
Prescription d'une	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge K E_{-k}^{min}$	€€	✓*
inertie minimale	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge \frac{f_0}{2ROCOFmax} g_k^h$	€	✓*
Effacement des EnR	$\sum_{j=1}^{N} g_j^h + VG^h = D^h$	€*	$\wedge$
Soutien dynamique	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} r_j^{h,pr} \ge g_k^h - C^{fixed}$	€+ ? <sup>†</sup>	✓* ⚠

✓\*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...

€\*: un niveau limité d'effacement peut réduire le coût.

 $\bigwedge$ : effets contre-productifs liés aux contraintes inter-temporelles.

?<sup>†</sup>: coûts des moyens alternatifs non inclus.

 $\bigwedge$ :  $\Downarrow$  inertie,  $\Uparrow$  niveau de charge et besoin en réserve.

égration des EnR

Contraintes de sûreté renforcées

Nouvelle formulation du problème FCUC 00000000

Conclusions

## Coût/bénéfices des mesures palliatives

UC modifié	Contrainte	Coût	Bénéfice
Prescription d'une réserve minimale	$\sum_{j=1}^{N} r_{j}^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$	€€€	✓*
Prescription d'une	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge K E_{-k}^{min}$	€€	✓*
inertie minimale	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} H_j S_{n,j} u_j^h \ge \frac{f_0}{2ROCOFmax} g_k^h$	€	✓*
Effacement des EnR	$\sum_{j=1}^{N} g_j^h + VG^h = D^h$	€*	$\wedge$
Soutien dynamique	$\sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{N} r_j^{h,pr} \ge g_k^h - C^{fixed}$	€+ ? <sup>†</sup>	✓* ⚠

**Objectif 3 :** Analyser le coût et les bénéfices de différentes mesures palliatives.

Besoin d'une méthode innovante pour inclure une contrainte dynamique performante dans le placement optimal de prodution.

égration des EnR

Contraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions 000

## Plan de la présentation

Modélisation

Intégration des EnR

3 Contraintes de sûreté renforcées

- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
  - Décomposition de Benders pour le problème FCUC
  - Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence
  - Cas d'étude
  - Comparaison avec une contrainte indirecte



Modélisation Intégration des EnR

nR Contraintes de sûre 0000

ntes de sûreté renforcées Nou

 $q-q_m(x,y) \leq 0, \quad \forall m=1,\ldots,M.$ 

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions 000

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

- $\underset{x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}}{\text{minimizer}} \quad f_1(x) + f_2(y)$
- sous contraintes  $G(x, y) \le 0$ , H(x, y) = 0,

- $\mathbf{y} \quad \rightarrow \mathsf{\acute{e}tat} \mathsf{ des} \mathsf{ groupes}$
- $x \rightarrow puissance (MW)$
- $q_m \rightarrow \text{creux}$  de fréquence (Hz)
- $\underline{q} \rightarrow \text{seuil de sûreté (Hz).}$



Nouvelle formulation du problème FCUC 00

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

 $q-q_m(x,y) \leq 0, \quad \forall m=1,\ldots,M.$ 

- $\min_{x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}} f_1(x) + f_2(y)$
- sous contraintes  $G(x, y) \leq 0$ , H(x, y) = 0,

- $\rightarrow$  état des groupes y
- $\rightarrow$  puissance (MW) х
- $\rightarrow$  creux de fréquence (Hz)  $q_m$
- $\rightarrow$  seuil de sûreté (Hz). q



Modélisation Intégration des EnR

es EnR Contrainte 0000

traintes de sûreté renforcées

 $q-q_m(x,y) \leq 0, \quad \forall m=1,\ldots,M.$ 

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

- $\min_{x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}} f_1(x) + f_2(y)$
- sous contraintes  $G(x, y) \le 0$ , H(x, y) = 0,

- $\mathbf{y} \longrightarrow ext{état} ext{ des groupes}$
- $x \rightarrow puissance (MW)$
- $q_m \rightarrow \text{creux}$  de fréquence (Hz)
- $\underline{q} \rightarrow \text{seuil de sûreté (Hz).}$



Nouvelle formulation du problème FCUC 00

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

- $\rightarrow$  état des groupes y
- $\rightarrow$  puissance (MW) х
- $\rightarrow$  creux de fréquence (Hz)  $q_m$
- $\rightarrow$  seuil de sûreté (Hz). q

 $\min_{x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}} f_1(x) + f_2(y)$ sous contraintes  $G(x, y) \leq 0$ , H(x, y) = 0,

 $q-q_m(x,y) \leq 0, \quad \forall m=1,\ldots,M.$ 



 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$ 

minimiser  $f_1(x) + f_2(y)$ 

sous contraintes G(x, y) < 0.

Nouvelle formulation du problème FCUC

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

 $q-q_m(x,y) \leq 0, \quad \forall m=1,\ldots,M.$ 

- $\rightarrow$  état des groupes y
- $\rightarrow$  puissance (MW) х
- $\rightarrow$  creux de fréquence (Hz)  $q_m$
- $\rightarrow$  seuil de sûreté (Hz). q



H(x, y) = 0,

Contraintes de sarete remoitees Environnes Environnes Contraintes de sarete remoitees Noo

 $f_1(x) + f_2(y)$ 

minimiser

 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$ 

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

- $\mathbf{y} \quad \rightarrow \mathsf{\acute{e}tat} \mathsf{ des} \mathsf{ groupes}$
- $x \rightarrow puissance (MW)$
- $q_m \rightarrow \text{creux}$  de fréquence (Hz)
  - $\rightarrow$  seuil de sûreté (Hz).

sous contraintes  $G(x, y) \leq 0,$   $\underline{q} - H(x, y) = 0,$  $\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$ 



#### $\epsilon~\rightarrow$ Tolérance de convergence

Contraintes de sufete remorcees INC

 $f_1(x) + f_2(y)$ 

minimiser

 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$ 

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

# Décomposition de Benders pour le problème FCUC

- $\mathbf{y} \quad \rightarrow \mathsf{\acute{e}tat} \mathsf{ des} \mathsf{ groupes}$
- $x \rightarrow puissance (MW)$
- $q_m \rightarrow \text{creux}$  de fréquence (Hz)
  - $\rightarrow$  seuil de sûreté (Hz).

sous contraintes  $G(x, y) \leq 0,$   $\underline{q} = -$ H(x, y) = 0, $\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$ 



#### $\epsilon~\rightarrow$ Tolérance de convergence

#### Modélisation Intégration des Ene Contraintes de sûreté renforcées Nouvelle formulation du problème FCUC OCO Décomposition de Benders pour le problème FCUC

 $\min_{x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}} f_1(x) + f_2(y)$ 

sous contraintes G(x, y) < 0,

ightarrow état des groupes

y

- $x \rightarrow puissance (MW)$
- $q_m \rightarrow \text{creux}$  de fréquence (Hz)
- $\underline{q} \rightarrow \text{seuil de sûreté (Hz)}.$

$$H(x, y) = 0,$$
  
$$\underline{q} - q_m(x, y) \le 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$$



#### $\epsilon~\rightarrow$ Tolérance de convergence

Modélisation Intégration

ation des EnR Co O

ontraintes de sûreté renforcées 000 Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

## Nouvelle formulation du problème FCUC

Master problem : UC  $c^* = \underset{y \in Y}{\text{minimiser}} \quad \mathcal{V}(y) + f_2(y)$ sous contraintes  $G(x, y) \leq 0$ , H(x, y) = 0, Coupe de faisabilité, Coupe d'optimalité.

### Slave problem : FCED (sur l'horizon d'optimisation)

$$\begin{split} \mathcal{V}(\bar{y}^i) &= \underset{x \in X}{\text{minimiser}} \quad f_1(x) \\ \text{sous contraintes} \quad G(x, \bar{y}^i) \leq 0, \\ \quad H(x, \bar{y}^i) &= 0, \\ \quad \underline{q} - q_m(x, \bar{y}^i) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M. \end{split}$$

Modélisation Intégration

ration des EnR (

ontraintes de sûreté renforcées 000 Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

## Nouvelle formulation du problème FCUC

Master problem : UC  $c^* = \underset{y \in Y}{\text{minimiser}} \quad \mathcal{V}(y) + f_2(y)$ sous contraintes  $G(x, y) \leq 0$ , H(x, y) = 0, Coupe de faisabilité, Coupe d'optimalité.

### Slave problem : FCED (sur l'horizon d'optimisation)

 $\mathcal{V}(\bar{y}^{i}) = \underset{x \in X}{\text{minimiser}} \quad f_{1}(x)$ sous contraintes  $G(x, \bar{y}^{i}) \leq 0,$  $H(x, \bar{y}^{i}) = 0,$  $\underline{q} - q_{m}(x, \bar{y}^{i}) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$ 





 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 Nouvelle formu

 0000
 0000
 0000
 0000000

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence



















## Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence



Slave	oroblem			
Modélisation 0000	Intégration des EnR 0000	Contraintes de sûreté renforcées	Nouvelle formulation du problème FCUC	Conclusions

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(y) &= \min_{x \in X, w \in Y} \quad f_1(x) \\ \text{s.t.} \quad G(x, w) \leq 0, \\ H(x, w) &= 0, \\ \frac{q}{2} - q_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i) - \langle s_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i), x - x^\ell \rangle \leq 0, \quad \forall \ell = 1 \dots L, \forall m = 1, \dots, M, \\ w &= \bar{y}^i. \end{aligned}$$



Slave r	oroblem		
	0000		
Modélisation		Nouvelle formulation du problème ECLIC	

$$\mathcal{V}(y) = \min_{x \in X, w \in Y} f_1(x)$$
  
s.t.  $G(x, w) \leq 0$ ,  
 $H(x, w) = 0$ ,  
 $\lambda^* \longleftrightarrow \frac{q}{w} - q_m^{\ell}(\bar{y}_{-m}^i) - \langle s_m^{\ell}(\bar{y}_{-m}^i), x - x^{\ell} \rangle \leq 0$ ,  $\forall \ell = 1 \dots L, \forall m = 1, \dots, M$ ,



 $\text{Convergence: } \check{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{L}}(\boldsymbol{x}^{\ell+1}) - \boldsymbol{q}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{x}^{\ell+1}) \leq \epsilon \Rightarrow \left( \tilde{\boldsymbol{x}}^{i}, \mathcal{V}^{i}, \boldsymbol{\lambda}^{i} \right) \parallel \bar{\boldsymbol{y}}^{i} \text{ irréalisable}$ 

Modélisation	Intégration des EnR	Contraintes de sûreté renforcées	Nouvelle formulation du problème FCUC	
			0000000	

# Cas d'étude



 Modélisation
 Intégration des EnR
 Contraintes de sûreté renforcées
 Nouvelle formulation du problème FCUC

 0000
 0000
 0000
 00000
 00000
 00000

## *Redispatch* du *Slave* $\rightarrow$ rapide, optimal et efficace !



tégration des EnR 000 ontraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions



tégration des EnR 000 ontraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions



tégration des EnR 000 Contraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions



tégration des EnR 000 ontraintes de sûreté renforcées

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions









Surcoût (%)




tégration des EnR 000 ontraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions 000

### Ouverture vers une amélioration de la convergence



tégration des EnR

Contraintes de sûreté renforcée

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

### Ouverture vers une amélioration de la convergence



tégration des EnR

ontraintes de sûreté renforcées

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

#### Ouverture vers une amélioration de la convergence



tégration des EnR

Contraintes de sûreté renforc

Nouvelle formulation du problème FCUC

Conclusions

#### Ouverture vers une amélioration de la convergence



Objectif 4 : Proposition d'une formulation du problème FCUC compatible avec les contraintes opérationnelles ✗, tenant compte de la dynamique du système ✓, et capable d'assurer l'optimalité ✓.

Vitesse de convergence de l'outil à ameliorer.

Modélisation Intégra 0000 0000 s EnR Contraintes de sû 0000 Nouvelle formulation du problème FCL

Conclusions

### Plan de la présentation

Modélisation

Intégration des EnR

3 Contraintes de sûreté renforcées

4 Nouvelle formulation du problème FCUC

- 5 Conclusions
  - Conclusions
  - Perspectives

Conclu	isions			
Modélisation 0000	Intégration des EnR 0000	Contraintes de sûreté renforcées	Nouvelle formulation du problème FCUC	Conclusions ●○○







Modèle flexible





Hypothèses de concavité Modèle flexible Bonne convergence





Définition de coupes Formulation convexe Convergence lente Hypothèses de concavité Modèle flexible Bonne convergence

Modélisation 0000	Intégration des EnR 0000	Contraintes de sûreté renforcées	Nouvelle formulation du problème FCUC	Conclusions 000
Perspe	ctives			



Améliorer la convergence et les coupes de faisabilité

N	Aodélisation	Intégration des EnR 0000	Contraintes de sûreté renforcées	Nouvelle formulation du problème FCUC	Conclusions

#### Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence Etudier la concavité et les coupes de faisabilité



Etudier la concavité

Décomposition de Benders + Plans sécants +

Améliorer la convergence

et les coupes de faisabilité

Euler explicite

Pas variable

Parallèlisation



Améliorer la convergence Et et les coupes de faisabilité

Pas variable Parallèlisation

Industrialisation pour des petits systèmes.



Améliorer la convergenceEtudier la concavitéPas variableet les coupes de faisabilitéParallèlisation

Industrialisation pour des petits systèmes.

Exploitation du savoir faire pour étudier l'impact des EnR intermittentes dans les grands systèmes.

Manail	
Manail	





### Stabilité du réseau électrique de distribution

### Analyse du point de vue automatique d'un système complexe

Enjeux des travaux de thèse

Soirée des doctorants IEEE

Vincent Gabrion, Gilles Malarange EDF R&D / Département EFESE

31 mars 2016



# Développement soutenu de la production renouvelable sur le réseau de distribution

Au 31 décembre 2015 :

- 16841 MW de production renouvelable raccordés au réseau d'ERDF sur 43627 MW installés en France dont :
  - 9191 MW d'éolien
  - 5217 MW de solaire
  - 1457 MW d'hydraulique
- 7245 MW de production renouvelable en file d'attente ERDF sur 13747 MW en France



# Impact de la production décentralisée sur le profil de tension HTA



# Impact de la production décentralisée sur le profil de tension HTA



## Options pour maîtriser le plan de tension en HTA

- Raccordement des producteurs décentralisés en départ dédié
  - Utilisé pour les gros producteurs
- Absorption/injection locale de réactif par une loi Q = P tan φ
  - Solution mise en œuvre sur les installations existantes
- Absorption/injection locale de réactif par une loi Q = f(U)
  - Alternative à Q = P tan φ proposée aux producteurs depuis février 2016
- Renforcement du réseau
  - Utilisé lorsque les autres options ne permettent pas de lever les contraintes
- Réglage en dynamique de la consigne de tension au niveau du régleur en charge du poste source
  - En cours d'expérimentation
- Utilisation de batteries
  - En cours d'expérimentation
- Écrêtement de production
  - A l'étude

### **Régulation locale de tension Q = f(U)**

Deux options de mise en œuvre :

Sans bande morte



## Régulation locale de tension Q = f(U)

Deux options de mise en œuvre :

Sans bande morte



Avec bande morte



La solution avec bande morte limite la sollicitation de Q(U) et la circulation de puissance réactive sur le réseau

### Caractéristiques de Q(U) proposée aux producteurs



(Source : document ERDF PRDE J.4.1.2.3 - 23)



## Caractéristiques de Q(U) proposée aux producteurs

Paramétrage recommandé par ERDF :

- temps de réponse de la régulation : 30 secondes
- mesure de la tension toutes les secondes, moyenne glissante 10 secondes
- précision de la régulation : +/- 5% P<sub>racc inj</sub>
- envoi d'une consigne en puissance réactive Q<sub>REF</sub> toutes les secondes
- fonctionnement de la régulation en boucle fermée
- l'arrêt d'une unité de production (ex : un onduleur dans un parc photovoltaïque) ne doit pas impacter le système de régulation.



## Impact de Q(U) sur la stabilité du réseau

- Tests réalisés en plein réseau avec 1 et avec 2 producteurs équipés de la régulation Q(U)
- Pas d'instabilité (e.g. pompage) constatée entre 2 régulations ou entre les 2 régulations et le régleur en charge du poste source
- En revanche, nous ne disposons pas de retour sur la stabilité du système en présence de nombreuses régulations Q(U)

Lancement d'une thèse sur le sujet

dans le cadre de

l'institut RISEGRID (EDF/SUPELEC)



Stabilité du réseau de distribution électrique – Analyse du point de vue automatique d'un système complexe

Marjorie COSSON (Oct. 2013 - Oct. 2016)

#### Soirée des doctorants IEEE PES France

31 Mars 2016









◆□▶ ◆■▶ ◆注▶ ◆注▶ 注 のへで

1 Contexte et objectifs de la thèse

- 2 Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- **5** Conclusion et perspectives

#### 1 Contexte et objectifs de la thèse

- Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- ④ Critère général de stabilité
- 6 Conclusion et perspectives

**Historiquement**, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte plus de 18 GW de production décentralisée.



**Historiquement**, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte plus de 18 GW de production décentralisée.



Production décentralisée ⇒ Élévation du plan de tension

**Historiquement**, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte plus de 18 GW de production décentralisée.



Production décentralisée ⇒ Élévation du plan de tension

<u>But</u> : Maintenir la qualité de fourniture

Marjorie Cosson

Stabilité des réseaux de distribution

marjorie.cosson@supelec.fr

**Historiquement**, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte plus de 18 GW de production décentralisée.



 $\begin{array}{l} \mbox{Production décentralisée} \\ \Rightarrow \\ \mbox{Élévation du plan de tension} \end{array}$ 

<u>But</u> : Maintenir la qualité de fourniture

 $\stackrel{\text{\tiny COM}}{\underset{\text{\tiny en fonction de } U}{\overset{\text{\tiny COM}}{\overset{\text{\tiny en fonction de } U}}}$ 

**Historiquement**, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte plus de 18 GW de production décentralisée.



 $\begin{array}{l} \mbox{Production décentralisée} \\ \Rightarrow \\ \mbox{Élévation du plan de tension} \end{array}$ 

<u>But</u> : Maintenir la qualité de fourniture

 $\stackrel{\text{\tiny COM}}{\underset{\text{\tiny en fonction de } U}{\overset{\text{\tiny COM}}{\overset{\text{\tiny en fonction de } U}}}$ 

⇒ Ces régulations représentent-elles un risque pour la stabilité des départs ?

Marjorie Cosson

### Structure des régulations Q(U)



marjorie.cosson@supelec.fr 5 / 27

### Structure des régulations Q(U)



#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraîner des risques pour la stabilité du système


#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraîner des risques pour la stabilité du système





#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraîner des risques pour la stabilité du système





#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraîner des risques pour la stabilité du système





PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraı̂ner des risques pour la stabilité du système



#### Conclusion :

Un même réseau peut être stable ou non en fonction des paramètres de sa régulation.



PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraı̂ner des risques pour la stabilité du système



#### Conclusion :

Un même réseau peut être stable ou non en fonction des paramètres de sa régulation.

 $\Rightarrow$  Comment les choisir?



#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraîner des risques pour la stabilité du système

#### $\Rightarrow$ Et en réalité?



#### PRODUCTEUR



La régulation Q(U) peut entraı̂ner des risques pour la stabilité du système





Problématique et objectifs de la thèse



Si le filtre est plus lent que *F*( paramètres du réseau ), alors le système est stable.

- Construire une méthode d'analyse de la stabilité d'un exemple donné,
- Simplifier l'analyse en proposant un critère explicite de stabilité d'un exemple donné,
- Sétablir un critère général de stabilité valable dans tous les cas.

- Contexte et objectifs de la thèse
- Ø Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- ④ Critère général de stabilité
- **6** Conclusion et perspectives











#### PRODUCTEUR

mariorie cosson@supelec



Marjorie Cosson

Stabilité des réseaux de distribution

marjorie.cosson@supelec.fr



#### PRODUCTEUR

#### Filtre de mesure :

- $\rightarrow$  à temps discret ( $T_e = 1s$ )
- $\rightarrow$  Ex : Passe-bas 1er ordre
- $\rightarrow a =$ la rapidité ( $\Leftrightarrow \tau$ )



#### Filtre de mesure :

- $\rightarrow$  à temps discret ( $T_e = 1s$ )
- $\rightarrow$  Ex : Passe-bas 1er ordre
- $\rightarrow a =$ la rapidité ( $\Leftrightarrow \tau$ )





PRODUCTEUR

marjorie.cosson@supelec.fr



PRODUCTEUR

marjorie.cosson@supelec.fr 10 /



#### PRODUCTEUR

#### **Conclusions** :

marjorie.cosson@supelec.fr

11 / 2i



#### PRODUCTEUR

#### **Conclusions** :

→ Système non-linéaire



#### PRODUCTEUR

#### **Conclusions** :

- → Système non-linéaire
- → Système hybride



#### PRODUCTEUR

#### **Conclusions** :

- → Système non-linéaire
- → Système hybride

# ⇒ Comment en étudier la stabilité ?

Construire l'abstraction discrète du système ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Marjorie Cosson

Stabilité des réseaux de distribution

marjorie.cosson@supelec.fr

Construire l'abstraction discrète du système ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Marjorie Cosson

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Construire l'abstraction discrète du système ... Affiner la partition de l'espace d'état ...

Jusqu'à ce que tous les modes n'aient qu'une seule destination.



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

#### Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

marjorie.cosson@supelec.fr

# Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Adapté quels que soient le nombre de producteurs, leur filtre, etc.
 Long et complexe

# Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

- Adapté quels que soient le nombre de producteurs, leur filtre, etc.
  Long et complexe
  - ⇒ Comment généraliser les résultats dans des cas simples?



- Contexte et objectifs de la thèse
- Ø Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- ④ Critère général de stabilité
- 6 Conclusion et perspectives
<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

$$\frac{1}{1+\tau p} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta U_{DG_{k+1}}^f = a\Delta U_{DG_k}^f + (1-a)\Delta U_{DG_k}$$

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Nom	Signification physique
K <sub>Q</sub>	~ distance Producteur $\leftrightarrow$ PS.
α	~ pouvoir réglant du producteur
а	~ la rapidité du filtre

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

#### Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre



Nom	Signification physique
K <sub>Q</sub>	~ distance Producteur $\leftrightarrow$ PS.
α	~ pouvoir réglant du producteur
а	~ la rapidité du filtre

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

#### Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

÷.



_	Nom	Signification physique	
	K <sub>Q</sub>	~ distance Producteur $\leftrightarrow$ PS.	
	α	~ pouvoir réglant du producteur	
	а	~ la rapidité du filtre	

<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

#### Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Nom

Ko

α

а



<u>But</u> : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de Q(U) pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Nom	Signification physique
K <sub>Q</sub>	~ distance Producteur $\leftrightarrow$ PS.
α	~ pouvoir réglant du producteur
<b>a</b>	~ la rapidité du filtre
_	

# Critères de réglage du filtre

Critère de réglage du filtre :



5 / 27

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.



mariaria cossan@sunal

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie?



En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie?



En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie?



 $K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$ 

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie?



n

marjorie.cosson@supelec.fr

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

 $\Rightarrow$  Ce comportement est il conforme à la théorie?



En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie?





En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$





En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- $\Rightarrow$  Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$





 $\tau_{lim} = 13s$ 

7 / 27

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- $\Rightarrow$  Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique?

Simulations pour différents  $\tau$ 



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

 $\tau_{lim} = 13s$ 

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie ? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$

Simulations pour différents  $\tau$ 



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

$$\tau_{lim} = 13s$$

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

$$au_{lim} = 13s$$
  
 $au_{lim} = 3s$ 

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- $\Rightarrow$  Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$



- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$



En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$



Conclusion :

Le critère est validé sur un exemple.

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie ? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?  $\tau > \tau_{lim}$
- $\Rightarrow$  Qu'a-t-on fait en pratique?  $\alpha \searrow$  et  $\tau = 6s$



#### $\Rightarrow$ Et à *N* producteurs?

3 / 27







Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

Toutes les dynamiques linéaires sont stables  $\implies$  Le système est stable



Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

Toutes les dynamiques linéaires sont stables  $\implies$  Le système est stable

Démonstration :???



Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

Toutes les dynamiques linéaires sont stables  $\implies$  Le système est stable

Démonstration :???



Faire une étude statistique


mariorie.cosson@supelec.fr

0 / 27



Quelques détails sur les scénarios :

60 scénarios chacun testés avec 6 réglages de filtre







Le critère semble être une condition suffisante à la stabilité



#### Le critère semble être une condition suffisante à la stabilité

Peut-on généraliser les résultats pour proposer un réglage valable dans tous les cas ?

marjorie.cosson@supelec.fr

20 / 27

- Contexte et objectifs de la thèse
- Ø Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- 6 Conclusion et perspectives



Définir le "pire cas" pour exprimer  $\overline{a_{lim}}$ . Si  $a > \overline{a_{lim}}$  alors le filtre stabilise tous les systèmes.



Définir le "pire cas" pour exprimer  $\overline{a_{lim}}$ . Si  $a > \overline{a_{lim}}$  alors le filtre stabilise tous les systèmes.

Influence des paramètres sur a<sub>lim</sub> :

- Plus le producteur est gros, plus  $a_{lim}$  /
- Plus le producteur est loin, plus  $a_{lim}$  /



Définir le "pire cas" pour exprimer alim. **Si**  $a > \overline{a_{lim}}$  alors le filtre stabilise tous les systèmes. Influence des paramètres sur a<sub>lim</sub> :

- Plus le **producteur est gros**, plus *a<sub>lim</sub>* ∕
- Plus le **producteur est loin**, plus *a<sub>lim</sub>* /



$$\begin{array}{l} P_{prod} &= 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} &= 40 \text{ km} \end{array} \right\} \quad \overline{a_{lim}} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau_{lim}} = 3s$$



Définir le "pire cas" pour exprimer  $\overline{a_{lim}}$ . **Si**  $a > \overline{a_{lim}}$  alors le filtre stabilise tous les systèmes. Influence des paramètres sur a<sub>lim</sub> :

- Plus le **producteur est gros**, plus *a<sub>lim</sub>* /
- Plus le **producteur est loin**, plus *a<sub>lim</sub>* /

$$\begin{array}{rcl} P_{prod} &=& 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} &=& 40 \text{ km} \end{array} \end{array} \right\} \quad \overline{a_{lim}} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau_{lim}} = 3s$$

#### Conclusion :

Si le filtre est <b>suffisamment</b>	⇒	Le fonctionnement sera <b>stable</b>
<b>lent</b> i.e. $\tau > 3$ s		quel que soit le réseau



Définir le "pire cas" pour exprimer  $\overline{a_{lim}}$ . **Si**  $a > \overline{a_{lim}}$  alors le filtre stabilise tous les systèmes. Influence des paramètres sur alim :

- Plus le **producteur est gros**, plus *a<sub>lim</sub>* /
- Plus le **producteur est loin**, plus  $a_{lim} \nearrow$

$$\begin{array}{l} P_{prod} = 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} = 40 \text{ km} \end{array} \right\} \quad \overline{a_{lim}} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau_{lim}} = 3s$$

#### Conclusion :

Si le filtre est <b>suffisamment</b>	⇒	Le fonctionnement sera <b>stable</b>
<b>lent</b> i.e. $\tau > 3$ s		quel que soit le réseau

 $\Rightarrow$  Et à N producteurs?

Marjorie Cosson

Stabilité des réseaux de distribution

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas?

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas?



On peut montrer que :

N producteurs de puissance P<sub>i</sub> répartis sur un réseau



**Un** producteur de puissance  $\Sigma P_i$ au bout de la plus longue ligne

alimN

<

 $a_{lim_{\Sigma N}}$ 

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas?



On peut montrer que :

N producteurs de puissance P<sub>i</sub> répartis sur un réseau



**Un** producteur de puissance  $\Sigma P_i$ au bout de la plus longue ligne

alimN



 $a_{lim_{\Sigma N}}$ 

Conclusion :

Les cas à N producteurs sont toujours **moins contraignants** que le pire cas défini à 1 producteur

 $\tau > 3s \implies$  Le système est stable

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique



Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage Q(U) doit répondre en moins de 10 secondes

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :

Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique





Réglage Q(U) doit répondre en moins de 10 secondes



Comparaison avec quelques exemples de grid codes :







Réglage Q(U) doit répondre en moins de 10 secondes





Réglage Q(U) doit répondre entre 10 et 60 secondes

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :

Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique

Réglage Q(U) doit répondre en moins de 10 secondes

Réglage Q(U) doit répondre entre 10 et 60 secondes









Comparaison avec quelques exemples de grid codes :

Réglage Q(U) spécifié mais sans contrainte dynamique

Réglage Q(U) doit répondre en moins de 10 secondes

Réglage Q(U) doit répondre entre 10 et 60 secondes

Que devient le critère de stabilité avec une moyenne glissante?







- Contexte et objectifs de la thèse
- Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- Oritère général de stabilité
- **5** Conclusion et perspectives

#### **Conclusions et Perspectives**





Étudier les interactions avec :

- ★ des filtres différents
- ★ d'autres acteurs
- ★ d'autres régulations
- Rédiger le mémoire !

# Merci de votre attention Avez vous des questions?